Über die

Messung von Luftgeschwindigkeiten.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

hohen philosophischen Fakultät der Landes-Universität Rostock

vorgelegt von

Alex. Marx

aus Berlin.

München 1904.

Druck von R. Oldenbourg.

Über die

Messung von Luftgeschwindigkeiten.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

hohen philosophischen Fakultät der Landes-Universität Rostock

vorgelegt von

Alex. Marx

aus Berlin.

München 1904.

Druck von R. Oldenbourg.

Referent: Herr Professor Dr. Matthiessen.

Dem

Geh. Regierungsrate und Professor an der Technischen Hochschule zu Berlin

HERMANN RIETSCHEL

in Verehrung und Dankbarkeit

gewidmet vom

Verfasser.

Inhalts-Verzeichnis.

Seite

Einleitung 1

1. Anemometrische Methode 3

Beschreibung der gebräuchlichsten Instrumente dieser Methode 3

Eichungsmethoden 6

Rundlaufapparat 6

Bewegung in gerader Bahn 9

Gasometer 10

Verwendung im Hochbau 11

Änderung der Angaben bei Umkehr der Luftrichtung . 12

Benutzung für Zwangslauf oder für freie Bewegung der Luft 12

Einfluſs der Gröſse des Luftstromquerschnittes auf die Anzeige des Instrumentes 13

Einfluſs des Alters der Instrumente auf das Eichungsergebnis 23

2. Manometrische Methode 24

Beschreibung derartiger Instrumente 24

Zusammenhang zwischen Luftdruck und Luftgeschwindigkeit nach älteren Versuchen 26

Nach Recknagels Versuchen 27

Recknagels Methode der manometrischen Geschwindigkeitsmessung 28

Mikromanometer 30

Unterschied der anemometrischen und manometrischen Methode 31

Seite

Einfluſs der Gröſse des Luftstromquerschnittes auf die an der Stauscheibe entstehenden Drücke 32
Stauscheibe nach Fig. 8 34
Stauscheibe nach Fig. 11 39
Besondere Stauscheibenformen 42
Ergebnisse der Versuche mit den Stauscheibenformen . 51
Die Konstante der Funktion $p = f(B, v)$ nach älteren Versuchen 52
Nach den Versuchen des Verfassers 59

Literaturübersicht.

1. Gehlers physikalisches Wörterbuch, 1842.
2. Peclet, Die Wärme und ihre Anwendung, 1860.
3. Wild, Über den gegenwärtigen Zustand der Anemometer und über Anemometerverifikation in Carls Repertorium der Physik, 1877.
4. Recknagel, Anemometer, Wiedemanns Annalen der Physik und Chemie, 1878.
5. Ruehlmann, Hydromechanik, 1880.
6. Recknagel, Über Luftwiderstand, Wiedemanns Annalen der Physik und Chemie, 1880.
7. Grashof, Theoretische Maschinenlehre, Band I mit dem Abschnitt Hydraulik, 1875, Band II mit dem Abschnitt Anemometer, 1883.
8. Recknagel, Über Luftwiderstand, Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, 1886.
9. Recknagel, Über Einrichtung und Gebrauch des Differentialmanometers, Archiv für Hygiene, 1893.
10. Recknagel, Die Lüftung, in Pettenkofer und Ziemssen, Handbuch der Hygiene, 1894.
11. Krell, Hydrostatische Mefsinstrumente, 1897.
12. Schreiber, Die Instrumente zur Bestimmung der Windstärke, Zeitschrift für Architektur und Ingenieurwesen, 1898.
13. Wolpert, Theorie und Praxis der Ventilation und Heizung, 4. Auflage 1901, Bd. III.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41552723_0019

Einleitung.

Die Messung der Geschwindigkeit atmosphärischer Luftströme, nämlich der Winde, ist schon oft und ausführlich beschrieben worden, so in Gehlers physikalischem Wörterbuch 1842 unter dem Stichwort »Windmesser«, in neuerer Zeit durch den recht beachtenswerten Aufsatz Schreibers »Die Instrumente zur Bestimmung der Windstärke«, 1898.

In den letzten Jahren hat sich nun, insbesondere für die Zwecke der Technik, das Bedürfnis geltend gemacht, auch die Druck- und Geschwindigkeitsverhältnisse künstlich erzeugter Luftströme genauer zu untersuchen, und man hat die anfangs erwähnten Methoden ohne weiteres auch für diesen Zweck angewandt. Indessen, wie im folgenden gezeigt werden soll, mit Unrecht; bestehen doch zwischen den Luftströmen der Atmosphäre und den künstlich erzeugten gewichtige Unterschiede, die nicht ohne Einflufs auf den benutzten Apparat sein können. So ist bei den Windmessern auf die häufig und oft plötzlich wechselnde Richtung der Luftströme Bedacht zu nehmen, diese Apparate müssen weit gröfsere Geschwindigkeiten aushalten und messen können, und schliefslich müssen bei künstlich erzeugten Luftströmen wegen ihrer meist geringen Querschnitte die bei Windmessern notwendigen Gröfsenabmessungen der Apparate bedeutend eingeschränkt werden. Aus allen diesen Gründen ist es

nicht möglich, die bei Untersuchung der atmosphärischen Luftströme benutzten Methoden und Apparate ohne weiteres auf die der künstlich erzeugten anzuwenden. Da eine besondere Besprechung der für letztgenannten Zweck bestimmten Methoden und Apparate bislang noch fehlt, soll sie im folgenden zusammen mit einigen hierher gehörigen Versuchen des Verfassers gegeben werden.

Die Geschwindigkeit strömender Luft direkt zu messen ist bisher nur dadurch versucht worden, dafs man leichte Körperchen, Flaumfedern oder dergleichen mitfliegen liefs und dann den zurückgelegten Weg bestimmte. Indessen geschah dies lediglich zu dem Zwecke, die Resultate gleichzeitig beobachteter Geschwindigkeitsmesser zu kontrollieren; auch würde sich diese Methode nur für die Messung von Windgeschwindigkeiten eignen.

Andere Methoden, Luftgeschwindigkeit direkt zu ermitteln, fehlen bislang.

Des weiteren liefse sich die Geschwindigkeit der durch irgend einen Querschnitt strömenden Luft dadurch bestimmen, dafs man mittels Gasuhren, Aspiratoren, Gasometern oder dergleichen das in der Sekunde durchgeflossene Volumen mifst. In einigen wenigen Fällen dürfte sich auch diese Methode empfehlen; allein in der Mehrzahl der Fälle erscheint es angebracht, Instrumente zu benutzen, die den vom Luftstrom ausgeübten Druck messen, und hieraus auf die entsprechende Geschwindigkeit zu schliefsen. Es handelt sich hierbei also eigentlich zunächst um Luftdruckmesser, nicht um Luftgeschwindigkeitsmesser.

Die genannten Instrumente lassen sich in zwei grofse Gruppen teilen, je nachdem durch den Luftdruck ein mit Zählwerk versehenes Flügelsystem in Umdrehungen versetzt wird, oder ob der Luftdruck auf irgend eine Weise direkt manometrisch bestimmt wird. Man pflegt die erstere Methode die anemometrische

und die letztere die manometrische Methode zu nennen, obgleich, wie eben erwähnt, eigentlich beide Methoden nur manometrische sind. Bisweilen unterscheidet man sie auch in dynamische und statische oder auch in totalisierende und momentane, Ausdrücke, deren Bedeutung aus dem folgenden zur Genüge hervorgehen wird.

1. Anemometrische Methode.

Die anemometrische Methode ist die ältere; die bezüglichen Apparate sind ja Nachbildungen der schon lange Zeit bekannten Windmühlen. Sie werden bereits von Leupold in seinem 1724 erschienenen »theatrum machinarum generale« besprochen, stammen also nicht etwa erst, wie vielfach angenommen wird, von Woltmann, der sie allerdings in seinem 1790 erschienenen Werke »Theorie und Gebrauch des hydrometrischen Flügels« eingehend bespricht.

Bei dieser Methode mifst man die Geschwindigkeit der Luft mittels sogenannter Anemometer. Ein Flügelsystem wird in den Luftstrom gehalten und aus der Anzahl der auf ein Zählwerk übertragenen Umdrehungen pro Sekunde wird dann auf die Luftgeschwindigkeit geschlossen.

Man unterscheidet Flügelrad- und Schalenkreuz-Anemometer. Bei den ersteren ist das Flügelsystem ein möglichst leicht gebautes Flügelrad mit graden oder schraubenförmig gebogenen Flügelflächen und einer der Windrichtung parallelen Drehungsachse, bei den Schalenkreuz-Anemometern ist das Flügelsystem ein Kreuz mit einer zur Luftrichtung senkrechten Drehungsachse und vier halbkugelförmigen Schalen an den freien Enden des Kreuzes (vgl. Fig. 1 und 2).

Die ersteren sind empfindlicher, die feineren Instrumente geben noch 0,12, neuerdings sogar noch 0,03 m/Sek. an (vgl. weiter unten), sie werden aber nur für Geschwindigkeiten bis höchstens 15 m/Sek. gebaut und müssen immer der Luftrichtung entgegengehalten werden; die letzteren sind weniger empfindlich, vertragen aber noch Geschwindigkeiten bis etwa 50 m/Sek. und brauchen der Luft nicht entgegengehalten zu werden, da sie auch bei

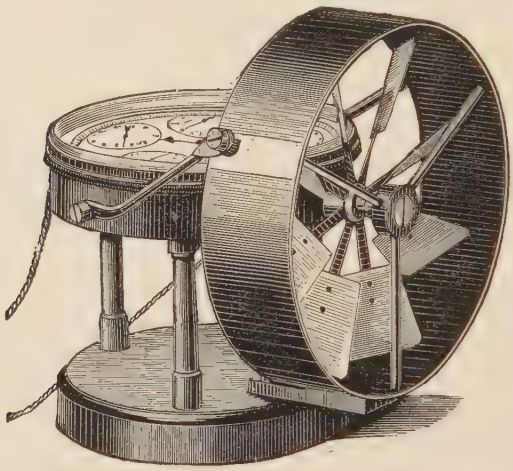


Fig. 1.

wechselnder Richtung stets die gleiche Angriffsfläche am Instrumente findet. Diese Instrumente werden deshalb auch zumeist in der Meteorologie oder zur Bestimmung von gröfseren Geschwindigkeiten verwendet.

Es gibt gewöhnliche Flügelrad-Anemometer für etwa 50 ℳ, bessere für Geschwindigkeiten von 0,2 bis 15 m/Sek. zum Preise von 75 ℳ, endlich Instrumente, die nach Recknagels Vorschlag zur Steigerung der Empfindlichkeit weit gröfseren Durchmesser und Flügel aus Glimmer besitzen, für Geschwindigkeiten von 0,12 bis 4 m/Sek. zum Preise von etwa 100 ℳ.

Ein vom Universitätsmechaniker Westien nach Angabe von Professor Matthiessen-Rostock 1887 gefertigtes Glimmerflügelrad-Anemometer für Geschwindigkeiten von 0,13 bis 3 m/Sek., mit freier Anordnung des Flügelrades und einem durch eine Schnecke angetriebenen, äufserst sauber geschnittenen Zählrade mit 100 Zähnen war auf der Naturforscherversammlung in Wiesbaden in der Sammlung medizinischer und physikalischer Instrumente ausgestellt. Dasselbe eignet sich besonders zu Ventilationsmessungen für die in vertikalen Kanälen aufsteigenden Luftströme (Atmometer).

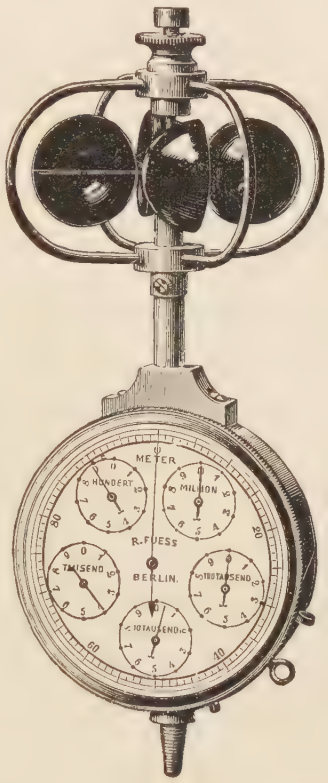


Fig. 2.

Vor einigen Monaten hat es Fuefs, Steglitz bei Berlin, durch eine gänzlich neue, vor Regelung der Patentansprüche nicht weiter zu besprechende Konstruktion erreicht, die Empfindlichkeit so weit zu steigern, dafs noch

0,03 m/Sek.

gemessen werden können. Das letztgenannte Instrument dürfte unter anderem im Bergwerksbetrieb von grofsem Nutzen sein. Die Bergpolizei verlangt gewöhnlich pro Mann und Minute 3 cbm »Frisch Wetter«, die Möglichkeit aber, die Erfüllung dieser Vorschrift bis in die letzten Ausläufer der Stollen

durch einwandfreie Messungen nachweisen zu können, fehlte bislang.

Bei allen vorgenannten Instrumenten mufs zu gleicher Zeit eine Uhr beobachtet werden. Um die damit verbundenen Unbequemlichkeiten zu vermeiden, wird von Fuefs ein mit Uhrwerk versehenes Instrument in den Handel gebracht, bei welchem nach etwa einer Minute das Zählwerk selbsttätig eingerückt und nunmehr nach genau einer Minute wieder ausgerückt wird. Der Preis beträgt 185 ℳ. Einige Instrumente tragen eine Vorrichtung, die nach einer bestimmten Anzahl von Umdrehungen einen elektrischen Kontakt betätigt, also etwa die Übertragung der Mefsresultate auf die Ferne ermöglicht, noch andere sind speziell für hohe Temperaturen eingerichtet, z. B. für die Untersuchung der Zugverhältnisse von Schornsteinen usw. Neuerdings baut Fuefs auch Flügelrad-Anemometer von nur 25 mm Durchmesser, die für manche Zwecke, bei denen die grofse körperliche Ausdehnung der bisherigen Instrumente die Bestimmung der Luftgeschwindigkeit unmöglich machte, recht brauchbar sein könnten, z. B. wenn es sich darum handeln sollte, die Verteilung der Luftgeschwindigkeiten über den Querschnitt eines Rohres festzustellen.

Schalenkreuz-Anemometer werden mit einem Durchmesser des Schalenkreuzes von etwa 60 bis 500 mm gebaut. Ein gutes Instrument der ersteren Gröfse kostet gegen 90 ℳ.

Alle Anemometer müssen einzeln, also jedes für sich geeicht werden. Zunächst benutzte man hierfür den »Rundlaufapparat von Combes«. In der Mitte eines möglichst grofsen Raumes kann eine vertikale Achse auf irgend eine Weise mit gleichmäfsiger Geschwindigkeit um sich selbst gedreht werden. Am oberen Ende der Achse befindet sich ein langer horizontaler Arm, dessen freies Ende demnach einen Kreis beschreibt. An diesem

freien Ende wird das zu eichende Instrument befestigt. Man kann also mittels dieses Apparates den vom Instrumente durchlaufenen Weg in m/Sek. (v) und die Anzahl seiner Umdrehungen pro Sekunde (n) bestimmen. Der Vorgang wird nun mit möglichst vielen verschiedenen Umlaufsgeschwindigkeiten wiederholt und die so erhaltenen Werte v, n auf irgend eine Weise, graphisch oder analytisch, ausgewertet.

Am bequemsten und in der Regel genauesten ist es, die zusammengehörigen Werte v, n als Koordinaten auf Millimeterpapier aufzutragen und eine Kurve durch die so erhaltenen Punkte hindurchzulegen. Beim späteren Gebrauch des Instrumentes mufs man sich dann dieses Diagramms zur Bestimmung der Geschwindigkeiten bedienen.

Mitunter ist es angebracht, für diese Kurve einen analytischen Ausdruck aufzustellen. Es genügt dann meistens, ihr die Form einer geraden Linie $v = a + b \cdot n$ zu geben, wobei die Konstanten nach der Methode der kleinsten Quadrate zu ermitteln sind. Hierbei ist a die »Empfindlichkeitsgrenze«, nämlich diejenige kleinste Geschwindigkeit, bei welcher das Instrument eben anfängt, sich zu drehen; sie wird bei der graphischen Auswertung durch den Schnittpunkt der Kurve mit der Ordinatenachse gegeben. Die Empfindlichkeitsgrenze geht nach früherem für Flügelrad-Anemometer jetzt bis zu 0,03 m/Sek. herab. Die gerade Linie ist indessen nur eine erste Annäherung an den wirklichen Charakter der Kurve, bei genaueren Arbeiten mufs man noch das quadratische Glied hinzunehmen, wodurch der Gebrauch der Formel recht unbequem wird. Es wird sich dann meistens schon aus diesem Grunde empfehlen, die graphische Auswertung anzuwenden.

Der Rundlaufapparat hat grofse Nachteile. Zunächst ist es nicht gleich, ob das Anemometer in Ruhe ist und

die Luft sich bewegt, wie beim späteren Gebrauche, oder ob umgekehrt das Instrument sich bewegt und die Luft in Ruhe ist, wie bei der Eichung. Ferner bewegt sich das Instrument bei der Eichung im Kreise, während seiner späteren Benutzung entsprechend auch bei der Eichung eine geradlinige Bahn gewählt werden müfste, und endlich wird schon ganz kurze Zeit nach Benutzung des Rundlaufapparates die Zimmerluft in der Richtung seiner Umdrehung in Bewegung gesetzt; es entsteht der schon Woltmann bekannte »Mitwind«, welcher nach Recknagel Fehler bis 5 % erzeugen kann.

Dennoch ist dieser Apparat viel verbreitet, weil es eben eine bessere Eichmethode zurzeit noch nicht gibt. So ist auch die schon vor etwa 20 Jahren vom Sächsischen Ingenieur- und Architektenverein zum Studium der Prüfungsmethoden von Anemometern eingesetzte Kommission nach vielen Versuchen wieder auf den Rundlaufapparat zurückgekommen. Einige gröfsere ausgeführte Apparate dieser Art sind:

1. der von Rühlmann und Quintus Icilius für die Technische Hochschule zu Hannover gebaute, beschrieben in den Mitteilungen des Hannoverschen Gewerbevereins 1862 Seite 264,

2. der von Wild erwähnte, vgl. seinen Aufsatz in Carls Repertorium der Physik 1877 Seite 486,

3. der von Recknagel für seine Versuche über den Luftwiderstand benutzte Apparat, vgl. Wiedemanns Annalen der Physik und Chemie 1880 Seite 677,

4. der erst im vorigen Jahre von der Firma Fuefs für den Vorstand der Westfälischen Berggewerkschaftskasse in Bochum erbaute Apparat. Derselbe beschreibt einen Kreis von 6,5 m Durchmesser, hat also ca. 20 m Peripherie und kostete rund 5000 ℳ.

Diese Methode, von Hand nachgeahmt, kann öfter von Nutzen sein, wenn es sich darum handelt, roh zu

prüfen, ob ein lange Zeit unbenutztes Instrument in der Zwischenzeit nicht etwa durch Fall, Stofs oder ähnliche mechanische Einflüsse unbrauchbar geworden ist. Man stellt sich zu dem Zwecke in die Mitte eines Zimmers, befestigt das Anemometer an das Ende eines langen Stockes und schwingt das Instrument an dem Stocke in einem horizontalen Kreise herum. Bei nur einigermafsen grofser Geschicklichkeit gelingt es leicht, sich mit gleichmäfsiger Geschwindigkeit zu drehen und einen gleich grofsen Kreis mit dem Instrumente innezuhalten. Man kann auf diese Weise mindestens drei verschiedene Geschwindigkeiten erzeugen und die entsprechenden Werte v, n finden. Durch graphische Auswertung läfst sich dann eine Kurve aufstellen, die dem oben angegebenen Zwecke, nämlich zu prüfen, ob die dem Instrumente beigegebene Eichtabelle noch gültig sein dürfte oder nicht, vollkommen genügt. Ich habe derartige Versuche öfter unter Vergleichung mit den genauen Eichresultaten angestellt und kann daher diese »Methode des Umschwingens« für den angegebenen Zweck nur empfehlen.

Eine weitere Eichmethode besteht darin, dafs man das Instrument bekannte Wege — etwa auf Eisenbahnen — zurücklegen läfst. Allein abgesehen davon, dafs dieses Mittel nur in Ausnahmefällen zu Gebote stehen kann, wird der fast nie ganz fehlende Wind seinen Einflufs ausüben. Endlich aber erzeugt der fahrende Wagen, wie schon Grashof erwähnt, in der Luft vor sich Wirbel, die von Einflufs auf die Angaben des mitgeführten Anemometers sind.

Auch diese zweite Methode läfst sich für rohe Nachprüfung eines geeichten Anemometers brauchbar machen, indem man mit dem Instrumente einen langen zugfreien Gang mit verschiedenen Geschwindigkeiten abschreitet. Steht ein derartiger Gang zur Verfügung, liefert diese »Methode des Abschreitens« noch weit genauere Werte als die mittels Umschwingens.

Für das oben erwähnte Westiensche Atmometer hatte sich z. B. auf diese Weise nach oft wiederholten Messungen ergeben, wenn n die Anzahl der Umdrehungen und v die Geschwindigkeit pro Sekunde bedeutet,

$$v = \frac{n}{3{,}0404 + 0{,}2514 \cdot n - 0{,}0108 \cdot n^2}.$$

Diese Methode, das Instrument bekannte geradlinige Wege durchlaufen zu lassen, wird vielleicht demnächst an der Technischen Hochschule zu Berlin in verbesserter Weise wieder aufgenommen werden. Es wird hier für bestimmte andere Versuche ein 100 m langer unterirdischer Kanal von 1,50 · 2,50 m Querschnitt projektiert, der nebenbei für Anemometerprüfungen dienen soll. Es wird beabsichtigt, die Instrumente durch Elektromotor mit verschiedenen Geschwindigkeiten durch den Kanal zu bewegen; Ein- und Ausrücken des Zählwerks sowie Bestimmung der Zeitdauer erfolgen ebenfalls elektrisch. Es werden sich mittels dieser Einrichtung viele wertvolle Schlüsse auf die Theorie der Anemometer, besonders aber auf die Brauchbarkeit der Rundlaufapparate ziehen lassen.

Schliefslich kann man für Eichzwecke durch Gasometer oder Aspiratoren Luftströme von bekannter Geschwindigkeit beschaffen, eine Methode, die an der Technischen Hochschule zu Berlin vielfach benutzt worden ist. Auch von der bereits genannten Prüfungskommission des Sächsischen Architekten- und Ingenieurvereins ist diese Methode zunächst verwandt worden. Man hat sie indessen wieder aufgegeben, weil es nicht möglich war, Luftströme zu beschaffen, die über den ganzen Querschnitt hin gleiche Geschwindigkeit besafsen. Im Gegensatz hierzu lieferte der mir an der Technischen Hochschule zu Berlin zu Gebote stehende Apparat für Eichzwecke hinreichend gleichmäfsige Luftströme, die

allerdings hinsichtlich ihrer Menge nur recht bescheidenen Ansprüchen genügten, vgl. weiter unten.

Im Anschlufs hieran mögen einige Betrachtungen über die Verwendung der Anemometer im Hochbau bei der Prüfung von Ventilationsanlagen folgen. Hier entsteht hauptsächlich die Frage, wieviel Kubikmeter Luft pro Stunde durch einen Lüftungskanal in einen Raum strömen. Es würde ganz falsch sein, wenn man zur Beantwortung dieser Frage einfach das Instrument vor die Zuluftöffnung halten würde. Zunächst ist die Luftgeschwindigkeit nicht gleichmäfsig über den Querschnitt der Kanalöffnung verteilt, bei vielen Kanälen tritt sogar an dem unteren Teile eine rückläufige Bewegung ein. Es ist also notwendig, den Querschnitt der Öffnung in Felder zu teilen, jedes Feld für sich zu messen und die Mittelwerte zu bilden, oder aber noch zweckmäfsiger mit dem Instrumente in Schlangenlinie mehrere Minuten mit gleichmäfsiger Geschwindigkeit vor der Öffnung hin und her zu fahren.

Weiter entsteht die Frage, ob man nach Feststellung der Luftgeschwindigkeit bei den fast immer vergitterten Öffnungen die totale oder nur die freie Fläche für die Berechnung des Luftvolumens in Ansatz zu bringen hat. Entfernt man die Gitter für die Untersuchung, um dieser Frage aus dem Wege zu gehen, so schafft man in dem Kanale für die Untersuchung andere Verhältnisse als sie für den späteren Betrieb bestehen, da jetzt ein wesentlicher Widerstand für die Luftbewegung, nämlich das Gitter, fehlt, also auch der Kanal viel mehr Luft schafft. Am besten ist es, wenn von vornherein für derartige Messungen an irgend einer Stelle des Kanals eine verschliefsbare Öffnung zur Einführung von Anemometern geschaffen worden ist, wobei indessen vorausgesetzt wird, vgl. weiter unten Seite 22, dafs Kanal und Anemometer hinsichtlich ihrer Abmessungen besonderen Bedingungen

genügen. Ist die Öffnung nicht vorhanden, oder sind die genannten Gröfsenabmessungen bedenkliche, so soll man ein Instrument nehmen, dessen Konstruktionsteile der Luftbewegung nicht zu grofsen Widerstand entgegensetzen und etwa 10 mm von dem Gitter entfernt messen. Dann haben sich die durch das Gitter gebildeten Teilluftströme wieder zu einem geschlossenen Strom vereinigt, und man kann demgemäfs die gesamte Fläche des Gitters für die Berechnung der Luftmenge in Ansatz bringen.

Es ist selbstverständlich, dafs die Anemometer ganz anders zeigen, wenn die Richtung der bewegten Luft um 180° wechselt. So ergab z. B. die Eichung eines Flügelrad-Anemometers nach Fig. 1 in einem Rohr von etwa 160 mm Weite für $n > 1$,

wenn der Luftstrom von vorn
auf das Instrument traf . . $v = 0{,}20 + 0{,}78 \cdot n$,
wenn der Luftstrom von hinten
auf das Instrument traf . . $v = 0{,}24 + 0{,}83 \cdot n$.

Für $n = 5$ ergeben die beiden Gleichungen 4,10 bzw. 4,39, die beiden Geschwindigkeiten unterscheiden sich demnach um 6,7 %, bezogen auf die letztere. Vorbedingung für die zweite Benutzungsweise ist selbstverständlich, dafs das Instrument auch von vornherein hierfür konstruiert worden ist, was jedoch in den seltensten Fällen zutrifft. Gewöhnlich läuft die Flügelradachse in Steinlagern, aber nur der dem Winde abgekehrte Stein trägt hinter sich eine Druckplatte, gegen welche die Spitze der Anemometerachse durch den Wind gedrückt wird. Bei dem anderen Steine fehlt diese Platte, und nur wenn sie ebenfalls vorhanden ist, kann das Instrument auch von hinten benutzt werden.

Anemometer zeigen weiter durchaus verschieden, wenn sie frei in einen Luftstrom gehalten werden, oder wenn sie bündig in ein Rohr eingesetzt sind. Im ersteren

Falle ist der Widerstand des Instruments gegen die Luftbewegung gering, im letzteren Falle bedeutend, da nunmehr alle Luft durch das Instrument hindurch mufs und nicht zu den Seiten frei abfliefsen kann. Will man ein Instrument für den letzteren Fall gebrauchen, mufs es für diese Verhältnisse besonders geeicht werden. Die vom Verfertiger den Instrumenten beigegebenen Eichungsergebnisse beziehen sich, weil mit Rundlaufapparat gewonnen, immer auf »freie Bewegung der Luft«, man hat also bei Benutzung der Instrumente in Röhren darauf zu achten, dafs ihr Querschnitt durch das Instrument nicht wesentlich verengt wird, da andernfalls die Eichresultate nicht stimmen.

Durch Überlegungen dieser Art kommt man zu der Frage, wann die Angaben eines für freie Bewegung der Luft geeichten Anemometers durch die Abmessungen eines Kanalquerschnittes merklich beeinflufst werden. Ich habe die Beantwortung dieser Frage in folgender Weise zu geben versucht:

Ein Flügelrad-Anemometer der Firma Fuefs nach Fig. 1 wurde für mehrere Benutzungsweisen jedesmal besonders geeicht. Der das Flügelsystem umschliefsende Ring hatte einen Durchmesser von 71 mm, das Zählwerk ging bis 10 Millionen, der Preis betrug 75 ℳ. Es war kurz vorher von der Firma mittels Rundlaufapparats geeicht worden, naturgemäfs für freie Bewegung der Luft. Die Eichresultate enthält die Kurve 1 in Fig. 3.

An der Technischen Hochschule zu Berlin stand mir weiter ein Gasometer von 1500 l Inhalt, ein sogenannter Kubizierapparat der Firma S. Elster, Berlin, zur Verfügung. Er gestattete

1. die eingeschlossene Luft unter beliebigen Druck bis zu 80 mm Wassersäule zu setzen,

2. beliebige Mengen davon ausfliefsen zu lassen und genau abzumessen.

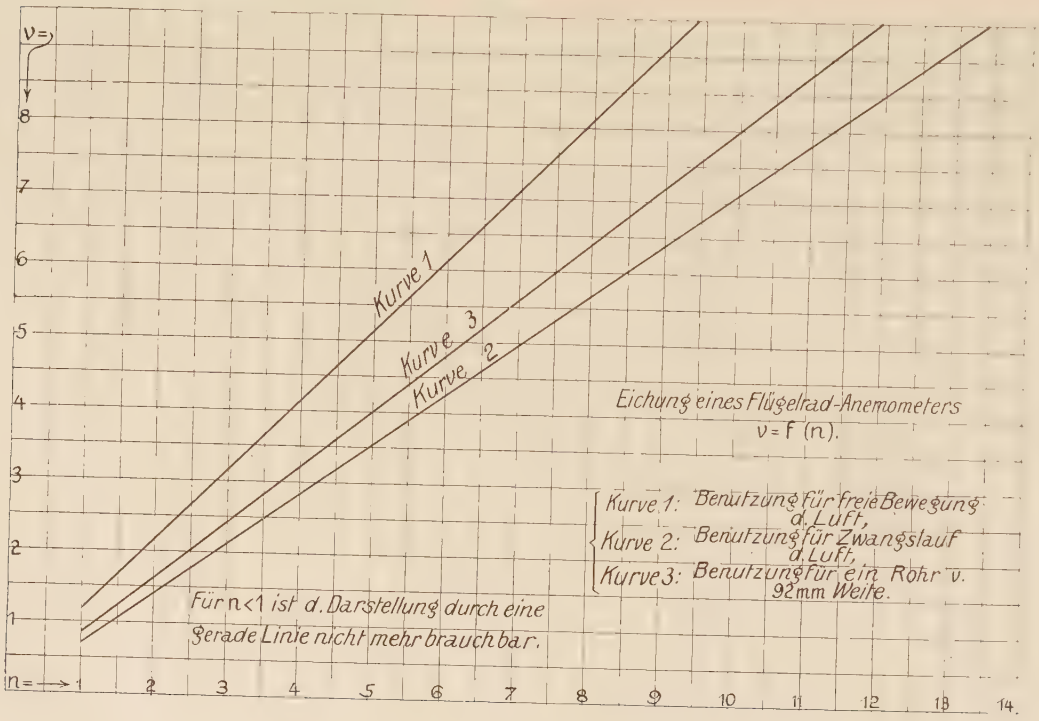

v=
8
7
6
5
4
3
2
1
Kurve 1
Kurve 3
Kurve 2
Eichung eines Flügelrad-Anemometers
v = f (n).
Kurve 1: Benutzung für freie Bewegung d. Luft,
Kurve 2: Benutzung für Zwangslauf d. Luft,
Kurve 3: Benutzung für ein Rohr v. 92mm Weite.
Für n<1 ist d. Darstellung durch eine gerade Linie nicht mehr brauchbar.
n=
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14

Fig. 3.

Das Ableitungsrohr des Apparates hatte fast den Durchmesser des Anemometers. Es wurde in ein längeres Zinkblechrohr von 71 mm Weite überführt und an das letztere das zu untersuchende Instrument befestigt. Es mufste nunmehr alle aus dem Gasometer strömende Luft durch das Anemometer hindurch, mit anderen Worten, das Instrument wurde für »Zwangslauf der Luft« geeicht. Die auf diese Weise gewonnenen Eichresultate sind ebenfalls in Fig. 3 als Kurve 2 graphisch vereinigt worden.

Die so erhaltene Kurve fällt erheblich tiefer, oder anders ausgedrückt, das Instrument ist bei dieser Benutzung bedeutend empfindlicher. Während z. B. in einem Luftstrom von 5 m Geschwindigkeit das Instrument bei freier Bewegung der Luft 4,86 Umdrehungen pro Sekunde macht, beträgt die Umdrehungszahl bei Zwangslauf 7,04. Um ferner 6 Umdrehungen pro Sekunde zu erzeugen, ist im ersteren Falle ein Luftstrom von 6,14, im letzteren Falle nur ein solcher von 4,27 m Geschwindigkeit erforderlich.

Schon aus diesen beiden Kurven geht hervor, dafs die Eichkurve des Anemometers sich mehr der einen oder der anderen der beiden gefundenen Kurven nähern wird, je nachdem das den Luftstrom enthaltende Rohr im Verhältnis zum Durchmesser des Anemometers gröfser oder kleiner sein wird. Es entsteht nun die Frage, welchen Durchmesser das Luftleitungsrohr im Verhältnis zum Anemometerdurchmesser haben darf, damit die für freie Bewegung der Luft gefundene Kurve noch benutzt werden kann, ohne dafs die so ermittelten Geschwindigkeiten wesentlich von der wirklichen abweichen, die Fehler also etwa unter 5% bleiben.

Zu dem Zwecke wurde statt des Rohres von 71 mm Weite ein solches von 92 mm Weite an den Kubizierapparat angeschlossen. Die Querschnittsüberführung war eine sehr allmähliche, und aufserdem wurde am Anfang

des Rohres ein Drahtgitter eingeschaltet, dessen grofse Brauchbarkeit zu Zwecken gleichmäfsiger Luftverteilung ich schon wiederholt erkannt habe. Auf diese Weise wurde eine hinreichend gleichmäfsige Luftverteilung im Rohre erreicht. Die gefundene Eichkurve ist ebenfalls in Fig. 3 als Kurve 3 eingetragen worden.

Die nach dieser Kurve bestimmten Geschwindigkeiten weichen von der Kurve für freie Bewegung der Luft um 28 %, von der für Zwangslauf gefundenen um 11 % ab. Läfst man nur höchstens Abweichungen von 5 % zu, so ergibt sich, dafs bei einem Rohr von etwa 100 mm Weite das betreffende Anemometer von 71 mm Durchmesser nicht benutzt werden darf, sondern eventuell für diese Verwendung neu geeicht werden mufs.

Die Eichmethode mittels des Kubizierapparats ist einwandfrei, hat aber den Nachteil, dafs sie nur Rohre von etwa 100 mm Durchmesser mit Geschwindigkeiten bis zu etwa 4 m zu untersuchen gestattet. Die Versuche mufsten deshalb hier abgebrochen werden. Vielleicht können demnächst weitere Versuche mit folgender anderen Zwecken dienender Einrichtung angestellt werden. Durch einen Ventilator wird Luft durch mehrere nebeneinander liegende Rohre von etwa 1 m Länge und 71 mm Durchmesser gedrückt. Sie münden in einem kleinen mit Glasscheiben abgedeckten Kasten. An der Mündung der Rohre innerhalb des Kastens befindet sich an jedem Einzelrohr ein mittels des Kubizierapparates für Zwangslauf genau geeichtes Flügelrad-Anemometer. Alle Instrumente sind aufserhalb des Kastens abzulesen und gleichzeitig ein- und ausrückbar. An die gegenüberliegende Wand des Anemometerkastens kann dann irgend ein Blechrohr angeschlossen werden. Aus der Angabe der Anemometer und dem Querschnitte der angeschlossenen Versuchsleitung ergibt sich die in demselben erzeugte Geschwindigkeit. Etwaige Querschnittsänderungen werden

allmählich bewirkt, hinter dem Anemometerkasten mufs ferner ein engmaschiges Drahtgitter angeordnet werden, um gleichmäfsige Luftverteilung zu bewirken. Diese Einrichtung gestattet dann, erheblich gröfsere Luftmengen als mit dem Kubizierapparat hinreichend genau abzumessen.

Die bisher gefundenen Resultate können die aufgeworfenen Fragen keineswegs erschöpfend beantworten; sie genügen aber, um zu zeigen, dafs Anemometer, die für freie Bewegung der Luft etwa mittels Rundlaufapparates geeicht worden sind, für Untersuchungen von Luftströmen, die in geschlossenen Rohrleitungen fortgeleitet werden, nicht ohne weiteres brauchbar sind, da zwischen Zwangslauf und freier Bewegung der Luft bedeutende Unterschiede bestehen. Im vorliegenden Falle unterscheiden sich die Geschwindigkeiten um 30% der für freie Bewegung geltenden Geschwindigkeit.

Vielleicht genügen die gewonnenen Resultate auch, um wenigstens annähernd zu bestimmen, bei welchen Gröfsenabmessungen der Rohrleitung und der Anemometer schon die für freie Bewegung geltenden Beziehungen stattfinden. Es werde der Durchmesser der Rohrleitung mit D, der des Anemometerringes mit d bezeichnet, dann ist das Verhältnis $\frac{d}{D}$ bei den Versuchen mit Zwangslauf $\frac{71}{71} = 1$, bei den Versuchen mit dem Rohr von 92 mm Weite $\frac{71}{92} = 0{,}77$, bei freier Bewegung der Luft $\frac{71}{\infty} = 0$.

Für eine bestimmte Umdrehungszahl, etwa 5, ergeben nun die Kurven Fig. 3 folgende Werte:

$$\frac{d}{D} = 0, \qquad 0{,}77 \quad 1,$$

$$v_5 = 5{,}15, \quad 4{,}0, \quad 3{,}55.$$

Diese Werte kann man in der Gestalt

$$v_5 = f\left(\frac{d}{D}\right)$$

zusammenfassen (vgl. Fig. 4).

Ich weifs sehr wohl, dafs die in Fig. 4 gezeichnete Kurve, weil nur durch drei Punkte bestimmt, auf zweifel-

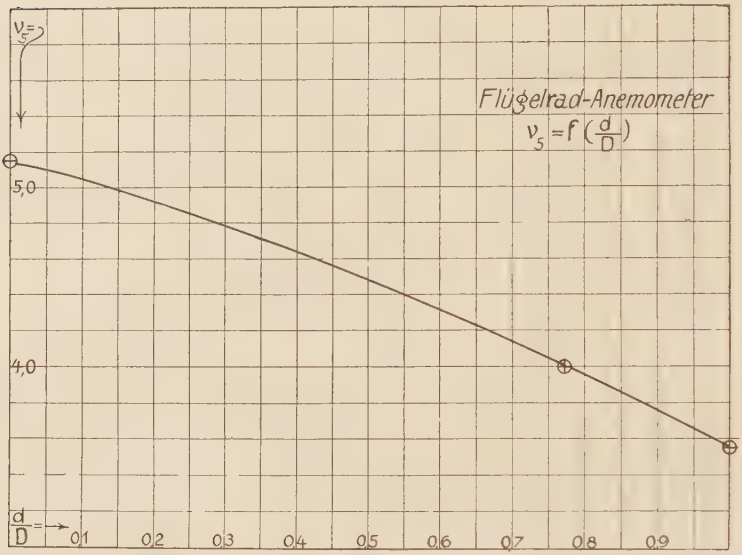


Fig. 4.

haftem Boden steht. Es ist mir aber hier auch nicht darum zu tun, einwandfreie Zahlen zu liefern, ich will vielmehr nur zeigen, wie man die aufgeworfenen Fragen beantworten könnte, wenn mehr Mittel als im vorliegenden Falle zu Gebote ständen.

Man kann bei Geschwindigkeitsbestimmungen kaum gröfsere Fehler als höchstens 5% zulassen, bei der wahren Geschwindigkeit 5,15 m, gefunden für $\frac{d}{D} = 0$, also höch-

stens 0,26 m, die abgelesene Geschwindigkeit könnte also auch 5,15—0,26 = 4,89 m betragen. Dem würde nach Fig. 4 ein $\frac{d}{D}$ von 0,23 entsprechen. Wenn also der Fehler von 5% in der Geschwindigkeitsbestimmung dadurch verursacht werden würde, dafs die Luft in einer Rohrleitung fortgeleitet wird, müfste bei Messung mit dem Instrumente von 71 mm Ringdurchmesser für den Durchmesser der Rohrleitung die Beziehung bestehen

$$\frac{d}{D} < 0{,}23,$$

$$D > \frac{71}{0{,}23},$$

$$D > 309 \text{ mm}.$$

Der Durchmesser der Rohrleitung müfste also mit anderen Worten das $\frac{309}{71} = 4{,}35$fache desjenigen des Anemometerringes betragen, damit durch die Querschnittsverengung des Anemometers keine gröfseren Fehler als 5% bedingt werden. Bei Rohrleitungen kleineren Durchmessers mufs das Instrument jedesmal für den betreffenden Fall besonders geeicht werden.

Eine ähnliche Erscheinung zeigt sich auch bei Schalenkreuz-Anemometern; nur dafs man hier den Fall des Zwangslaufes der Konstruktion dieser Instrumente wegen nicht einrichten kann.

Ein Schalenkreuz Anemometer von 57,5 mm Durchmesser des von den Aufsenpunkten der Schalen beschriebenen Kreises war mittels Rundlaufapparates geeicht worden; Fig. 5 enthält die gefundene Kurve als Nr. 1.

Dasselbe Instrument wurde dann am Kubizierapparat vor einem Rohr von 92 mm Weite geeicht; das Resultat ist ebenfalls in Fig. 5 als Kurve 2 enthalten.

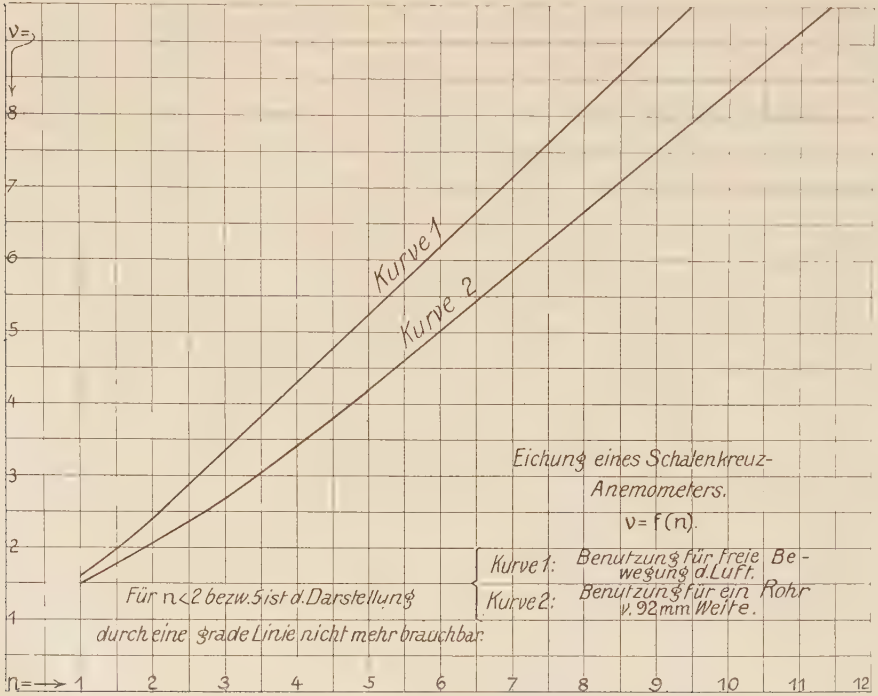

v=
8
7
6
5
4
3
2
1
Kurve 1
Kurve 2
Eichung eines Schalenkreuz-
Anemometers.
v = f(n).
Kurve 1: Benutzung für freie Bewegung d. Luft.
Kurve 2: Benutzung für ein Rohr v. 92 mm Weite.
Für n < 2 bezw. 5 ist d. Darstellung
durch eine grade Linie nicht mehr brauchbar.
n= → 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

Fig. 5.

Die Angaben der Kurve 2 weichen um 21% von denen der Kurve 1 ab, ein Unterschied, der selbstverständlich bei einigermafsen genauer Messung nicht vernachlässigt werden darf. Zugleich zeigt die Figur, dafs der krumme Teil bei der Kurve 2 viel früher anfängt, und dafs beide Kurven wahrscheinlich nach derselben Empfindlichkeitsgrenze konvergieren.

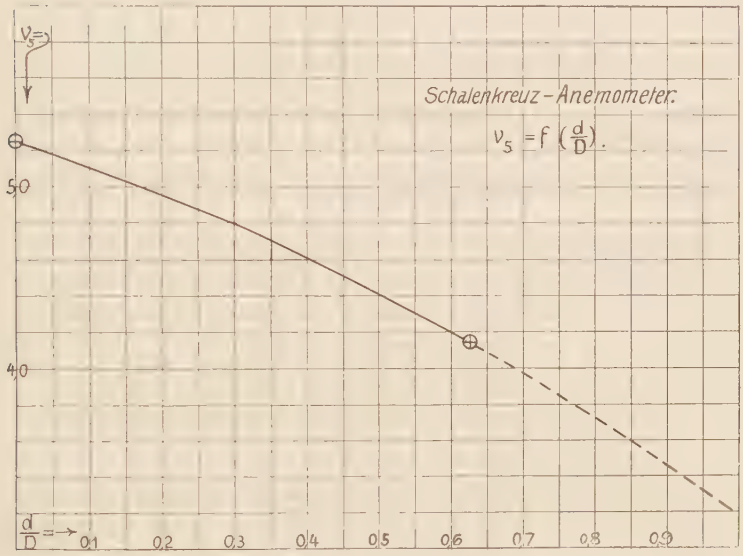


Fig. 6.

Eine ähnliche Betrachtung wie bei den Flügelrad-Anemometern würde hier liefern:

$$\frac{d}{D} = \frac{57{,}5}{\infty} = 0, \qquad v_5 = 5{,}25,$$

$$\frac{d}{D} = \frac{57{,}5}{92} = 0{,}625, \quad v_5 = 4{,}15.$$

Die Kurve $v_5 = f\left(\frac{d}{D}\right)$ wird einen ähnlichen Verlauf wie die für das Flügelrad-Anemometer gefundene haben;

es ist deshalb in Fig. 6 versucht worden, auch die vorstehenden Zahlen zu vereinigen. Läfst man wieder 5 % als gröfsten Fehler gelten, so erhält man die Geschwindigkeit 5,25 — 0,26 = 4,99. Dafür ist $\frac{d}{D} = 0{,}185$, also $D > \frac{57{,}5}{0{,}185} > 311$ mm oder gröfser als das $\frac{311}{57{,}5} = 5{,}4$ fache des Schalenkreuz-Durchmessers.

Alle diese Betrachtungen liefern, wie bereits erwähnt, noch kein abschliefsendes Urteil, wohl aber lehren sie, dafs Anemometer, die mittels Rundlaufapparates für freie Bewegung der Luft geeicht worden sind, nicht benutzt werden dürfen, wenn man sie bündig in ein Luftleitungsrohr einsetzt, ja, dafs diese Instrumente nicht einmal benutzt werden können, wenn das betreffende Rohr erheblich gröfseren Querschnitt besitzt als der gesamte Querschnitt des Anemometers beträgt, dafs es vielmehr bei Benutzung für einen derartigen Fall erst besonders geeicht werden mufs, und dafs schliefslich die bei der Eichung mittels Rundlaufapparates bestehenden Verhältnisse wahrscheinlich wieder eintreten, wenn das Rohr den 5- bis 6fachen Durchmesser des Anemometers besitzt.

Die Eichung der Anemometer ist selbstverständlich von Zeit zu Zeit zu wiederholen. Verstaubung der Lager oder dergleichen hat indessen bei den besseren Instrumenten nur unmerklichen Einflufs. Wenn nicht mechanische Verletzungen des Instruments erfolgen, bleiben die Eichresultate jahrelang dieselben, wie ich schon wiederholt gefunden habe. Eine Einölung wird seitens des Verfertigers bei der Herstellung vorgenommen, darf aber später nicht mehr wiederholt werden, es sei denn, dafs von neuem geeicht wird. Die Aufbewahrung mufs des Öles wegen an einem mäfsig temperierten Orte erfolgen.

Werden die Instrumente jedoch dem Luftstrom für die Messung ständig ausgesetzt, ändern sich die Eichresultate verhältnismäfsig schnell, wie sich aus folgendem ergibt.

Es wurden drei Anemometer nach Fig. 1 bündig am Ende je eines Rohres von 71 mm Durchmesser befestigt und Luft mittels Ventilators durch diese drei Rohre hindurchgeblasen. Die Instrumente waren vorher mittels des Kubizierapparates auf Zwangslauf der Luft geeicht worden. Nach ca. 125 Betriebsstunden hatte

Instrument 1: 2,3,
» 2: 2,9,
» 3: 2,9,

die Instrumente also im Mittel 2,7 Millionen Meter Luftweg angezeigt. Sie wurden hierauf von neuem geeicht. Es ergab sich, dafs die der gleichen Umdrehungsanzahl entsprechende Geschwindigkeit jetzt bei

Instrument 1 um 7%,
» 2 um 4%,
» 3 um 7%,

im Mittel also um 6% niedriger war als am Anfang der Versuche. Die Instrumente sind also durch den Gebrauch empfindlicher geworden, was wohl auf Abnutzung und Lockerung der Spitzen und Lager der Achse zurückzuführen ist. Jedenfalls geht aus dem Versuche hervor, dafs diese Instrumente nach höchstens 2 bis 3 Millionen Meter Luftweg neu geeicht werden müssen, wenn Fehler von 5% in der Geschwindigkeitsangabe nicht überschritten werden sollen.

In der überwiegenden Mehrzahl der Fälle benutzt man diese Instrumente so, dafs man sie dem zu messenden Luftstrome nur 2 bis 3 Minuten aussetzt. Wenn dann die mittlere Geschwindigkeit der zu untersuchenden Luftströme etwa 5 m beträgt, würden über 3000 einzelne

Untersuchungen möglich sein, ehe das Instrument neu geeicht zu werden brauchte, mit anderen Worten, es reicht für immer aus, da es vor Erreichung dieser Zahl längst durch einen mechanischen Unfall reparaturbedürftig geworden ist.

Mitunter werden diese Instrumente indessen auch ständig benutzt, dem Luftstrom also längere Zeit ausgesetzt. In diesem Falle ist nach den vorhergehenden Ergebnissen Vorsicht in der Anwendung geboten, da die Instrumente, trotzdem sie bis 10 Millionen Meter Luftweg reichen, schon nach 2 bis 3 Millionen einer neuen Eichung bedürfen, wenn anders Fehler von 5% in der Angabe nicht überschritten werden sollen.

Es mögen hiermit die Betrachtungen über die anemometrische Methode zur Messung von Luftgeschwindigkeiten abgeschlossen werden. Wie man sieht, ist sie keineswegs einfach und nur, weil es nichts Besseres gab, so weit vervollkommnet worden, dafs sie zu exakten Versuchen einigermafsen brauchbar wurde.

---

2. Manometrische Methode.

Im Gegensatz zur anemometrischen Methode steht die manometrische. Bei ihr wird der von der Luft ausgeübte Druck direkt gemessen, und zwar durch Gewichte, Federn, Flüssigkeitssäulen oder Manometer irgend welcher Form. Aus Vorversuchen mufs dann noch der Zusammenhang zwischen Luftdruck und Luftgeschwindigkeit festgestellt sein, um mit dem Apparate arbeiten zu können.

Einer der ältesten Apparate dieser Art ist der von Leupold in der bekannten Schrift 1724 für meteorologi-

sche Zwecke beschriebene. Ein kleiner horizontaler, auf Schienen laufender Wagen trägt eine vertikale Platte, welche dem Winddruck unter Benutzung einer Windfahne ausgesetzt wird. Beim Zurückgehen des Wagens auf seiner Unterlage wird mittels Rolle ein konstantes Gewicht gehoben, dessen Drehungsmoment unter Benutzung einer Schnecke mit seiner Erhebung zunimmt.

Bouguer versah später eine derartige Druckplatte auf der Rückseite mit einem viereckigen Stabe, der leicht in einem gleichgrofsen Hohlprisma gleiten konnte und beim Zurückgehen eine Feder innerhalb des Hohlprismas zusammenprefste.

Diese mit einer Druckplatte arbeitenden Apparate sind dann noch mannigfach verbessert worden und in dieser oder jener Form noch heute im Gebrauch. Allen gemeinsam ist aber die dem Winde senkrecht entgegenzuhaltende »Druckplatte«.

Endlich ist noch der Lindsche Apparat erwähnenswert, eine Anwendung der in der Hydromechanik als Pitotsche Röhre bekannten Konstruktion auf die Geschwindigkeitsmessung von Luftströmen. Der Apparat besteht im wesentlichen aus einem U-förmigen Wassermanometer, dessen einer Schenkel oben horizontal abgebogen und trompetenartig erweitert ist. Wird dieses Ende dem Luftstrom entgegengehalten, so bewirkt er in dem abgekehrten Schenkel eine Erhöhung des Wasserspiegels. Aus der Differenz der beiden Wasserspiegel läfst sich dann auf die Geschwindigkeit des Windes schliefsen.

Von neueren Konstruktionen der manometrischen Methode seien folgende erwähnt:

Zunächst das statische Anemoskop von Fuefs, konstruiert, um die Luftgeschwindigkeit in senkrechten Ventilationskanälen zu kontrollieren. Es besteht aus einem Wagearm mit nur einer Schale und entsprechendem

Gegengewicht. Der Luftstrom sucht die Schale zu heben und erzeugt dadurch einen Ausschlag. Damit das Instrument nicht ständig oszilliert, gleitet das Gegengewicht in Glyzerin. Der Apparat ist beispielsweise im Krankenhaus Urban in Berlin zur Kontrolle der Ventilation in mehreren Exemplaren eingerichtet.

Weiter wären die beiden vom Ingenieur Recknagel konstruierten Ventilationskontrollapparate zu nennen, der eine für geschlossene Luftkanäle, der andere für Luftaustrittsöffnungen. In beiden Fällen sucht der Luftstrom eine entgegengehaltene Metallfahne zu drehen und besitzt die genügende Geschwindigkeit, wenn hierbei ein bestimmter, besonders kenntlich gemachter Ausschlag erzielt wird.

Ferner gehören hierher die statischen Anemometer von Professor Recknagel und Professor Wolpert, bei welchen der Luftstrom ein Flügelrad entgegen der Kraft einer Feder um einen bestimmten Winkel zu drehen sucht.

Schliefslich sei noch das Pendelanemometer von Fuefs genannt. Eine senkrechte Aluminiumplatte ist um die obere Kante drehbar aufgehängt. Der Luftstrom dreht diese Platte, und je nach der Gröfse des Winkels wird auf die Luftgeschwindigkeit geschlossen.

Wie bereits erwähnt, mufs bei allen diesen Instrumenten aus Vorversuchen der Zusammenhang zwischen Luftdruck und Luftgeschwindigkeit ermittelt worden sein, was indessen für die genannten Instrumente nur in recht unvollkommener Weise zutrifft. Für ebene und senkrecht vom Winde getroffene Platten soll dieser Zusammenhang nach Newton allgemein die Form haben

1. $$p = \frac{v^2 \cdot s}{2\,g} \text{ kg/qm},$$

wenn v die Geschwindigkeit der Luft in m/Sek., s das Gewicht von 1 cbm der bewegten Luft in Kilogramm und g die Beschleunigung durch die Schwere bedeutet.

Die rechte Seite erhält aber noch einen Erfahrungsfaktor, der nach Newton etwa 1,3 ist, so dafs die berichtigte Formel lautet:

2. $$p = 1{,}3\,\frac{v^2 \cdot s}{2\,g}\ \text{kg/qm}.$$

Indessen sagt noch Wild in dem angegebenen Aufsatze vom Jahre 1877, dafs auch nach den neuesten Untersuchungen der Zusammenhang zwischen Winddruck und Windgeschwindigkeit so unsicher festgestellt ist, dafs man bei den bezüglichen Windgeschwindigkeitsmessungen mit Fehlern von 10% rechnen mufs. Es konnten daher auch alle diese Apparate keine grofse Bedeutung erlangen, bis Recknagel 1880 seine umfangreichen Versuche über den Luftwiderstand veröffentlichte, vgl. die Literaturangaben. Erst seit dieser Zeit beginnt die manometrische Methode zur Messung von Luftgeschwindigkeiten mehr Bedeutung zu erlangen und die anemometrische allmählich zu verdrängen.

Recknagel hatte durch Versuche den Widerstand bestimmt, welchen die Luft auf Platten ausübt, die mit verschiedenen Geschwindigkeiten im Kreise herumgeführt wurden, und zwar handelte es sich dabei um kreisförmige Platten von 10 bis 500 mm Durchmesser, 2 bis 10 m Geschwindigkeit und 1 bis 5 m Entfernung von der Drehachse. Nimmt man an, dafs der Widerstand der gleiche bleibt, wenn die Platte ruht und die Luft mit der gleichen Geschwindigkeit anströmt, so ergibt sich nach diesen Versuchen für unendlich grofse Kreise, d. h. also für geradlinige Bewegung, dafs ein Luftstrom von der Geschwindigkeit v m/Sek. und solcher Dichtigkeit, dafs 1 cbm Luft s kg wiegt, in der Mitte einer senkrecht getroffenen, kreisförmigen Platte einen Überdruck erzeugt von der Gröfse

3. $$\frac{v^2 \cdot s}{2\,g}\ \text{mm Wassersäule}$$

über den Druck B der bewegten Luft. Bringt man also mit dem Mittelpunkt einer solchen Platte in geeigneter Weise ein Manometer in Verbindung, so erhält man einen Ausschlag von der Gröfse

$$4. \qquad B + \frac{v^2 s}{2 g} \text{ mm Wassersäule.}$$

In entsprechender Weise wird in der Mitte der Rückseite ein Unterdruck von der Gröfse

$$5. \qquad 0{,}37 \frac{v^2 s}{2 g} \text{ mm Wassersäule}$$

erzeugt, das Manometer würde also für diesen Punkt der Scheibe einen Ausschlag von der Gröfse

$$6. \qquad B - 0{,}37 \frac{v^2 s}{2 g} \text{ mm Wassersäule}$$

ergeben.

Es ist bei diesen und den folgenden Betrachtungen immer zu unterscheiden, ob es sich um den mittleren Druck oder um den Druck im Mittelpunkt der Scheibe handelt. Die Seite 27 aufgeführte Newtonsche Formel enthält den mittleren Druck, die obigen Beziehungen Recknagels den Druck im Mittelpunkt der Scheibe.

Die Beziehungen 4 und 6 hatte Recknagel (vgl. Recknagel, Die Lüftung, in Pettenkofer und Ziemssen, Handbuch der Hygiene) dazu benutzt, Luftgeschwindigkeiten auf manometrische Weise zu bestimmen. Er nahm eine kleine kreisrunde Dose, die durch eine zu den ebenen Begrenzungsflächen parallele Scheidewand in zwei Kammern geteilt war. Jede Kammer trug in der Mitte der Aufsenwand eine kleine Öffnung und am Rande ein dünnes Röhrchen, das gestattete, den in der Mitte der Scheibe erzeugten Druck durch die betreffende Kammer hindurch zu einem Mefsinstrument fortzuleiten.

Dem Obigen entsprechend würde ein Manometer, das mit der vorderen Kammer in Verbindung gebracht

wird, einen Ausschlag in Millimeter Wassersäule ergeben von der Gröfse

7. $$P_1 = B + \frac{v^2 \cdot s}{2\,g},$$

ebenso an der Rückseite

8. $$P_2 = B - 0{,}37\,\frac{v^2 \cdot s}{2\,g}.$$

Subtrahiert man beide Gleichungen, so erhält man

9. $$P_1 - P_2 = 1{,}37\,\frac{v^2 \cdot s}{2\,g}$$

oder

10. $$v = \sqrt{\frac{(P_1 - P_2)}{1{,}37 \cdot s} \cdot 2\,g}.$$

Die mathematische Subtraktion läfst sich auch am Manometer ausführen, indem man die vordere Kammer mit dem einen, die hintere mit dem anderen Schenkel eines U-förmigen Flüssigkeitsmanometers verbindet. Der erhaltene Ausschlag ist dann unmittelbar $(P_1 - P_2)$. Dosen, wie sie vorher beschrieben sind, werden jetzt vielfach in der angegebenen Weise in Verbindung mit einem Manometer zur Geschwindigkeitsmessung strömender Luft verwendet und führen den Namen Stauscheiben. Sie sind, wenn auch nicht immer in zweckmäfsiger Form, im Handel erhältlich.

Aus der Gleichung 9 ergibt sich, dafs einer Luftgeschwindigkeit von 10 m zwar ein Ausschlag von 9 mm

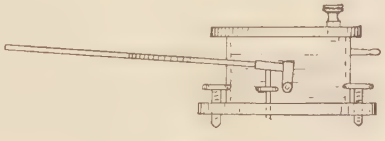


Fig. 7.

Wassersäule, einer Luftgeschwindigkeit von 1 m aber nur ein solcher von 0,1 mm Wassersäule entspricht. Es sind

also für derartige Zwecke nicht etwa gewöhnliche Manometer, sondern übersetzte, sogenannte Mikromanometer zu verwenden. Am besten in dieser Beziehung ist das von Recknagel konstruierte Differentialmanometer, vgl. die Literaturangaben. Eine Skizze zeigt Fig. 7.

Das Instrument kann durch Neigung des Glasschenkels beliebig übersetzt werden, indessen kaum höher als 30fach, so dafs also einem abgelesenen Millimeter in Wirklichkeit ein Druck von $^1/_{30}$ mm Wassersäule, vertikal gemessen, entspricht. Der Übersetzungsfaktor ist in jedem Falle besonders festzustellen, wozu man einer genauen Wage bedarf. Es hat deshalb Krell in neuerer Zeit versucht, vgl. die Literaturangaben, das Instrument für weitere Kreise brauchbar zu machen, indem er für jedes Instrument eine bestimmte Steigung unverrückbar einrichten liefs, wodurch die Feststellung des Faktors bei der jedesmaligen Benutzung unnötig wird. Ferner liefs er die Instrumente mit gröfserer Übersetzung anfertigen, nach seinem Vorschlag werden durch den Mechaniker G. A. Schultze, Berlin SW., fünf verschiedene Typen von Mikromanometern in den Handel gebracht, nämlich solche mit Übersetzungen von 1/10, 1/50, 1/100, 1/200 und 1/400.

Das Instrument mit der Übersetzung 1/400 gibt für ein abgelesenes Millimeter einen Druck von $^1/_{400} = 0{,}0025$ vertikale Millimeter Wassersäule an oder

$$\frac{0{,}0025 \cdot 1000}{1{,}293} = 2 \text{ mm Luftüberdruck.}$$

Da man an dem Instrumente noch ein Millimeter Ausschlag ablesen kann, reagiert es also noch auf Luftgeschwindigkeiten von

$$v = \sqrt{\frac{0{,}0025 \cdot 19{,}62}{1{,}37 \cdot 1{,}293}} = 0{,}17 \text{ m/Sek.}$$

Indessen haben die Krellschen Instrumente höherer Übersetzung noch einige Fehler, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll. Sie sind deshalb mehr für Messungen in Betracht zu ziehen, bei denen weniger Wert auf grofse Genauigkeit als vielmehr auf Einfachheit der Methode gelegt wird, etwa bei Prüfung technischer Anlagen. Bei wissenschaftlichen Arbeiten wird man sich nach wie vor mit Vorteil der Recknagelschen Apparate bedienen.

Es ist also durch Recknagels Versuche über den Luftwiderstand eine manometrische Methode zur Messung von Luftgeschwindigkeiten mit Hilfe von Stauscheiben und Manometern gegeben, die alle früheren manometrischen Methoden an Genauigkeit und Einfachheit weit übertrifft und in den letzten Jahren auch die anemometrische Methode fast gänzlich zu verdrängen beginnt, da sie vor dem Anemometer viele Vorteile voraus hat. So wird bei der manometrischen Methode nach Recknagel die Schwierigkeit der Eichung ganz umgangen, da diese Methode keinerlei Eichung bedarf. Die Stauscheibe kann weiter mit nur geringen Abmessungen bis zu 10 mm Durchmesser herab hergestellt werden, so dafs mittels dieser Methode überall da noch gemessen werden kann, wo die grofse körperliche Ausdehnung des Anemometers sonst eine Messung unmöglich gemacht hätte. Man braucht ferner die Stauscheiben nicht ängstlich vor Hitze, Staub oder dergleichen zu bewahren. Sie enthalten aufserdem keinerlei bewegliche Teile, die dem Verschleifs ausgesetzt sind oder durch äufsere Einflüsse leiden könnten. Vor allem aber braucht man bei der manometrischen Methode nicht mehr gleichzeitig die Uhr zu beobachten, so dafs die anemometrische Methode nur da noch von Vorteil sein wird, wo Durchschnittswerte der Geschwindigkeit, sei es über die Zeit oder über einen Querschnitt oder über beides gleichzeitig, gebildet werden sollen.

Bei künstlich erzeugten Luftströmen handelt es sich in der Mehrzahl der Fälle darum, die bewegte Luft durch Kanäle oder Rohre fortzuleiten. Bei der Untersuchung der Geschwindigkeits- und Druckverhältnisse müssen also die bezüglichen Instrumente in die Kanäle oder Rohre eingesenkt werden. Nach den vorhergehenden Betrachtungen erscheint es am zweckmäfsigsten, hierfür Stauscheiben zu wählen und die Geschwindigkeit der Luft unter Benutzung der Recknagelschen Beziehungen zu bestimmen. Hierbei ist indessen folgendes zu bedenken. Recknagel hatte seine Versuche mit Platten angestellt, die frei im Kreise herumgeführt wurden, die Stauscheibe bedingte also keine Querschnittsverengung im Luftstrom, die Luft konnte vielmehr ungehindert zu allen Seiten der Stauscheiben abfliefsen, ferner bestand bei seinen Versuchen in der Richtung der Bewegung keinerlei Druckabfall in der Luft, beides im Gegensatz zu den Verhältnissen, die beim Einsenken der Stauscheibe in ein Rohr oder Kanal eintreten würden.

Wegen der häufigen Anwendbarkeit der Recknagelschen Methode in der genannten Form schien es lohnend zu untersuchen, ob beim Einsenken der Stauscheibe in Rohre, die von Luftströmen durchflossen werden, andere Verhältnisse als die von Recknagel gefundenen eintreten, eventuell wie die Abmessungen von Stauscheibe und Rohrdurchmesser gewählt werden müssen, damit die Recknagelschen Beziehungen noch Gültigkeit behalten. Nach den Ergebnissen, die weiter oben Seite 22 mit den Anemometern bei gleicher Benutzungsweise gefunden worden sind, schienen die angedeuteten Untersuchungen durchaus notwendig.

Für die Versuche kam wieder der bereits erwähnte Kubizierapparat zur Verwendung. Er wurde zunächst nochmals ausführlich mit Hilfe einer Experimentiergasuhr von Elster, deren Angaben gleichfalls vorher mittels

Aspirators geprüft waren, geeicht. Es hatte sich ergeben, dafs die Glocke als zylindrisch anzusehen und der gefundene Fehler zu vernachlässigen ist.

An diesen Apparat wurde ein Rohr von ungefähr 1,5 m Länge und zunächst 54 mm Weite angesetzt, das etwa in der Mitte einen Stutzen zur Einführung der Instrumente trug. Die Stauscheiben wurden absichtlich nicht vor die Mündung des Rohres gehalten, sondern ein Stück rückwärts eingesenkt, damit nicht die an der Mündung des Rohres entstehenden Ausflufserscheinungen die zu untersuchenden Gesetze stören könnten. Eine an der genannten Stelle befestigte Stauscheibe wurde mit zwei Schläuchen versehen, die zu je einem Recknagelschen Manometer führten. Es konnte also mit den beiden Manometern gleichzeitig die Pressung P_1 und P_2 einzeln gemessen werden (vgl. Formel 7 und 8 auf Seite 29). Der Kubizierapparat gestattete, die Geschwindigkeit der durch das Rohr strömenden Luft zu ermitteln. Die Leitung vom Kubizierapparat zum Versuchsrohr besafs nur wenig und aufserdem ganz allmählich erfolgende Querschnittserweiterungen, das Rohr selbst hatte genügende Länge, aufserdem waren noch am Anfang desselben Drahtgitter eingeschaltet, und endlich war der Querschnitt nur gering, so dafs aus allen diesen Gründen angenommen werden konnte, die Geschwindigkeitsverteilung über den gesamten Querschnitt des Versuchsrohres sei eine gleichmäfsige.

Es standen also für die Bestimmung der Druck- und Geschwindigkeitsverhältnisse an dem Orte, wo die Stauscheibe eingesenkt war, die beiden Gleichungen 7 und 8 zur Verfügung (vgl. Seite 29)

$$P_1 = B + \frac{v^2 \cdot s}{2\,g},$$

$$P_2 = B - 0{,}37\,\frac{v^2 \cdot s}{2\,g}.$$

Die in den Gleichungen vorkommenden Gröfsen mit Ausnahme von B lassen sich durch den Versuch bestimmen, die B aber aus jeder Formel berechnen. Es heifse das erstere B_1, das zweite B_2. Beide Werte müssen übereinstimmen, wenn die Anwendbarkeit der Recknagelschen Formeln im vorliegenden Falle, nämlich beim Einschlufs der Stauscheibe in ein Rohr von 54 mm Weite, zulässig sein soll.

Als erste wurde eine im Handel erhältliche Stauscheibe untersucht (vgl. Fig. 8). Die Scheibe hatte einen

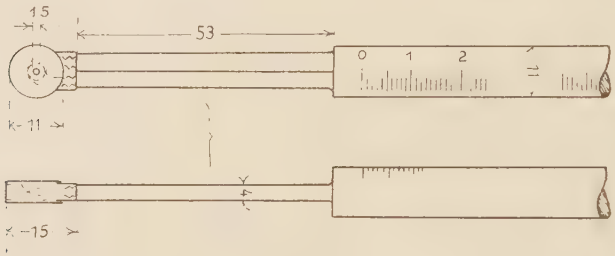


Fig. 8.

Durchmesser von 11 mm und wurde konzentrisch in das Versuchsrohr eingesenkt.

Aus der Anfangs- und Endstellung der Glocke des Kubizierapparates, aus der verflossenen Zeit und aus dem Querschnitt des Rohres ergab sich die Geschwindigkeit der das Rohr durchströmenden Luft. Da aber die Stauscheibe einen erheblichen Teil des Rohrquerschnitts verdeckte, wurde unter Zugrundelegung der betreffenden Querschnitte die mittlere Geschwindigkeit der die Stauscheibe treffenden Luft ermittelt. Sie werde im folgenden mit v bezeichnet, ihre Temperatur sei t, der auf 0^0 reduzierte Barometerstand b_0, die an der Vorderseite der Stauscheibe ermittelte Pressung in Millimeter Wassersäule P_1, die an der Rückseite ermittelte P_2. Dann ist die Dichte der Luft an der Stauscheibe

11. $$s = \frac{b_0 \cdot 1{,}293}{(1 + \alpha t)\, 760}.$$

Hierbei sind folgende Vereinfachungen vorgenommen. Es sei an der Stauscheibe der Überdruck der strömenden Luft über den Druck der äufseren Luft B mm Wassersäule, dann wäre in obige Formel nicht b_0, sondern genauer

$$b_0 + \frac{B}{13{,}6}$$

einzusetzen. Die vorgenommene Vereinfachung hat aber

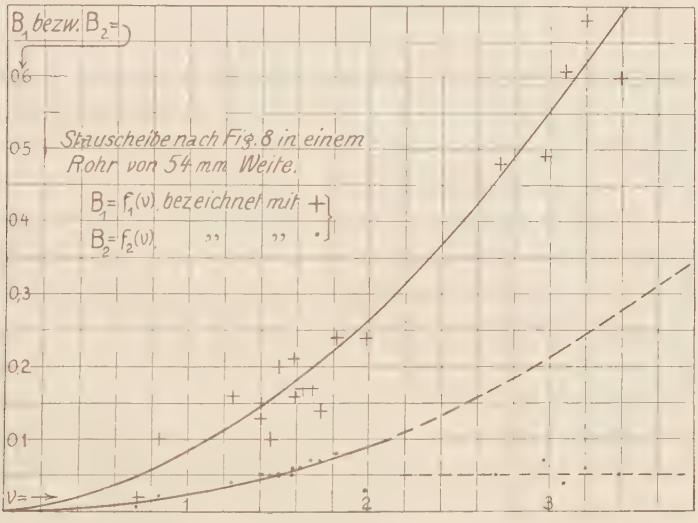


Fig. 9.

hier auf die Resultate keinen Einfluſs. Weiter ist bei s der Einfachheit wegen nicht die Feuchtigkeit in Betracht gezogen worden, da auch sie auf das Schlufsresultat keinen Einfluſs mehr hat.

Die gewonnenen Resultate enthält die Tabelle auf Seite 36. Es zeigt sich zunächst, daſs die Werte B_1 und B_2 nicht übereinstimmen, sondern daſs beide verschiedene

Funktionen von v sind. Auf Fig. 9 sind die bezüglichen Werte B_1 bzw. $B_2 = f(v)$ graphisch vereinigt. Die fünf letzten Werte für B_2 sind danach wahrscheinlich falsch, die übrigen Werte sowohl für B_1 als für B_2 scheinen die gezeichneten Kurven zu ergeben. Zu bemerken ist noch, dafs die Werte für B_1 weit mehr »streuen« als die für B_2. Die Werte für B_1 und B_2 müssen ja der Natur der Sache nach in Wirklichkeit zusammenfallen. Wo aber diese B-Kurve liegt, oberhalb oder unterhalb der gezeichneten oder dazwischen, läfst sich aus den vorliegenden Versuchen nicht erkennen. Es geht aus denselben nur hervor, dafs Recknagels Formeln für ein Rohr von 54 mm Weite und die untersuchte Stauscheibe nicht gültig sind.

Es entsteht nun zunächst die Frage, ob vielleicht die betreffende Stauscheibe in einem Rohr von gröfserer Weite nach den Recknagelschen Formeln zu brauchen wäre. Die Stauscheibe wurde demgemäfs in ein Rohr von 92 mm Weite eingesenkt und in gleicher Weise untersucht. Bei den folgenden Versuchsreihen ist jeder Punkt der Kurve mehrfach, meistens fünfmal bestimmt worden, die folgende Tabelle enthält indessen nur die gefundenen Mittelwerte.

Stauscheibe nach Fig. 8 in einem Rohr von 54 mm Weite.

Nr.	v	t	b_0	P_1	P_2	s	$\frac{v^2 s}{2g}$	B_1	B_2
1	0,73	16,7	767,2	0,056	0,0	1,230	0,033	0,02	0,01
2	0,85	16,7	767,2	0,146	0,0	1,230	0,045	0,10	0,02
3	1,25	16,7	767,2	0,256	0,0	1,230	0,098	0,16	0,04
4	1,40	17,0	766,9	0,256	0,0	1,228	0,123	0,13	0,05
5	1,40	17,0	766,9	0,276	0,0	1,228	0,123	0,15	0,05
6	1,46	17,0	766,9	0,236	—0,004	1,228	0,133	0,10	0,05
7	1,51	16,8	767,2	0,340	0,0	1,230	0,143	0,20	0,05
8	1,58	17,0	766,9	0,366	—0,004	1,228	0,156	0,21	0,05
9	1,59	17,0	766,9	0,316	0,0	1,228	0,158	0,16	0,06
10	1,63	16,8	767,2	0,340	0,0	1,230	0,167	0,17	0,06

Nr.	v	t	b_0	P_1	P_2	s	$\frac{v^2 s}{2g}$	B_1	B_2
11	1,69	16,7	767,2	0,350	0,0	1,230	0,179	0,17	0,07
12	1,73	17,0	766,9	0,326	0,0	1,228	0,187	0,14	0,07
13	1,82	16,8	767,2	0,446	0,0	1,230	0,208	0,24	0,08
14	1,98	17,0	766,9	0,482	—0,064	1,228	0,245	0,24	0,03
15	2,72	15,5	762,4	0,940	—0,126	1,227	0,463	0,48	0,05
16	2,97	15,5	762,4	1,038	—0,133	1,227	0,552	0,49	0,07
17	3,08	15,5	762,4	1,200	—0,180	1,227	0,593	0,61	0,04
18	3,20	15,5	762,4	1,320	—0,180	1,227	0,640	0,68	0,06
19	3,39	15,5	762,4	1,320	—0,216	1,227	0,719	0,60	0,05
	Stauscheibe nach Fig. 8 in einem Rohr von 92 mm Weite.								
20	0,70	18,2	765,0	0,046	—0,019	1,220	0,031	0,015	—0,008
21	1,36	18,8	762,6	0,154	—0,096	1,214	0,115	0,040	—0,054
22	1,38	16,9	758,0	0,279	—0,172	1,214	0,118	0,161	—0,129
23	1,79	16,0	762,2	0,398	—0,250	1,225	0,200	0,198	—0,176
24	2,17	16,0	762,2	0,465	—0,280	1,225	0,293	0,173	—0,172
25	2,18	16,7	758,0	0,382	—0,237	1,215	0,294	0,088	—0,128
26	2,22	19,0	776,2	0,434	—0,209	1,235	0,308	0,126	—0,094
27	2,35	18,0	758,3	0,490	—0,319	1,210	0,341	0,149	—0,193
28	2,55	15,5	762,4	0,564	—0,355	1,227	0,407	0,157	—0,205
29	2,99	19,0	776,2	0,895	—0,493	1,235	0,563	0,332	—0,285
30	2,99	18,0	758,3	0,640	—0,397	1,210	0,551	0,089	—0,193
31	3,17	15,5	762,7	0,838	—0,584	1,228	0,629	0,209	—0,352
32	3,28	19,0	776,2	0,905	—0,492	1,235	0,677	0,228	—0,242
	Stauscheibe nach Fig. 8 in einem Rohr von 160 mm Weite.								
33	1,04	21,0	762,8	0,098	—0,071	1,205	0,066	0,032	—0,047
	Stauscheibe nach Fig. 8 in einem Rohr von 250 mm Weite.								
34	0,43	18,3	751,5	0,014	—0,020	1,198	0,011	0,002	—0,016

Die beiden Werte für B fallen wieder nicht zusammen, sie sind deshalb in Fig. 10 graphisch vereinigt. Die Kurve B_2 ist hier sogar negativ. Mit dem gröfseren Rohrdurchmesser sind beide Kurven gefallen, die Kurve B_2 aber schneller als B_1, fast doppelt so schnell.

Nach diesen Ergebnissen wurde dieselbe Stauscheibe in ein Rohr von 160 mm Weite eingesenkt. Wegen der geringen Gröfse der Kubizierglocke liefs sich nur ein Punkt bestimmen, nämlich als Mittel aus 6 Versuchen der in der obigen Tabelle angegebene. Endlich wurde die Stauscheibe in ein Rohr von 250 mm Weite eingesenkt, auch hier liefs sich aus demselben Grunde nur

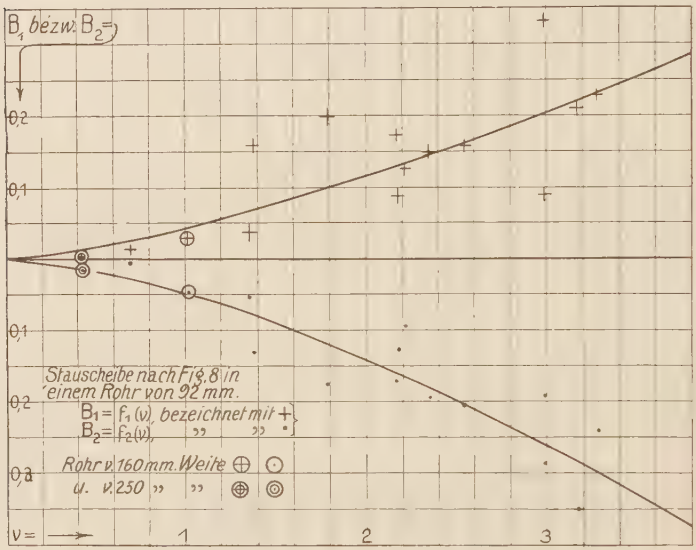


Fig. 10.

ein Punkt bestimmen, nämlich als Mittel aus 9 Versuchen der ebenfalls in der genannten Tabelle angegebene. Beide Punkte sind des Vergleiches wegen mit in Fig. 10 eingetragen. In beiden Fällen ist die Saugung negativ, und in beiden Fällen rücken die Kurven etwas näher aneinander, ohne jedoch in wünschenswerter Weise zusammenzufallen, auch scheint, als ob der Durchmesser des Rohres auf die Kurve B_2 weniger Einflufs ausübt als auf die Kurve B_1.

Aus den bisherigen Versuchen dürfte hervorgehen, dafs die untersuchte Stauscheibe in Rohren bis weit über 300 mm Durchmesser nicht zu brauchen ist, wenn man die Recknagelschen Beziehungen als richtig betrachtet.

Es wäre nun möglich, dafs die vorliegende Stauscheibe nur wegen unsachgemäfser Konstruktion zu diesen Ergebnissen geführt hätte, etwa weil die Zuleitungsrohre unnötig stark gehalten und besonders nebeneinander statt hintereinander angeordnet waren. Aus beiden Gründen

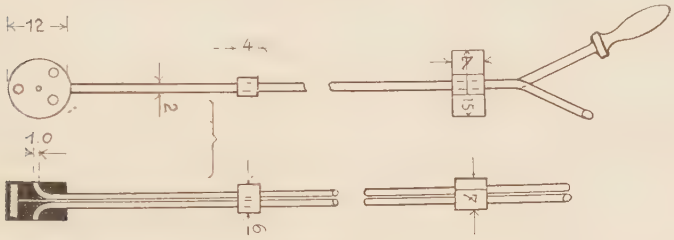


Fig. 11.

mufsten in der Nähe der Stauscheibe Wirbel entstehen, die das Ergebnis trüben konnten. Es wurde deshalb eine neue Stauscheibe hergestellt, entsprechend Fig. 11, welche genau kreisrund abgedreht war, möglichst dünne Zuleitungsröhrchen besafs und dieselben hintereinander statt nebeneinander angeordnet erhielt. Die Stauscheibe wurde entsprechend den früheren Versuchen zunächst wieder in ein Rohr von 54 mm Weite eingesenkt, die Mittelwerte der Versuchsergebnisse enthält die folgende Tabelle (vgl. Seite 41). Sie sind in Fig. 12 graphisch vereinigt.

Wie die entsprechenden Werte für 2, 3 und 4 m Geschwindigkeit zeigen, fallen die beiden Kurven für

diese Stauscheibe erheblich näher zusammen als die gleichen Kurven für die Stauscheibe nach Fig. 8. Trotz-

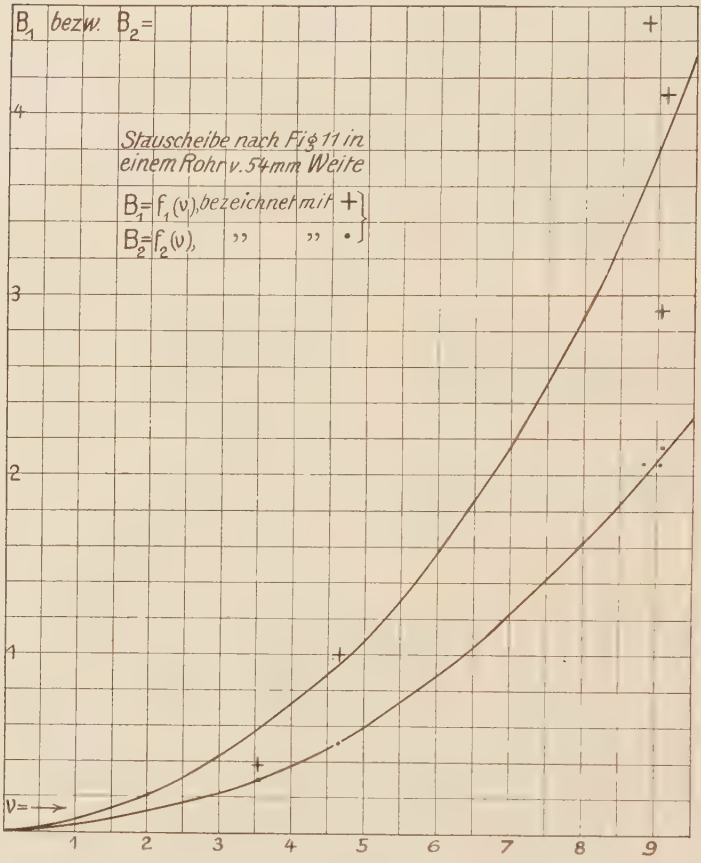


Fig. 12

dem genügt auch diese Annäherung der beiden Kurven noch nicht, um die Recknagelschen Beziehungen für diese Benutzungsart der Stauscheibe darzutun.

Stauscheibe nach Fig. II in einem Rohr von 54 mm Weite.

Nr.	v	t	b_0	P_1	P_2	s	$\frac{v^2 s}{2g}$	B_1	B_2
35	3,53	18,0	760,0	1,140	0,023	1,213	0,770	0,370	0,308
36	4,64	19,0	760,0	2,328	0,012	1,209	1,324	1,004	0,502
37	8,84	19,0	755,9	9,270	0,300	1,202	4,788	4,482	2,072
38	9,05	18,2	760,0	7,963	0,194	1,212	5,057	2,905	2,066
39	9,11	19,0	755,9	9,180	0,270	1,202	5,084	4,096	2,151

Stauscheibe nach Figur II in einem Rohr von 92 mm Weite.

40	1,33	17,0	760,0	0,138	—0,043	1,217	0,110	0,027	0,004
41	1,95	18,0	764,7	0,300	—0,030	1,220	0,237	0,063	0,058
42	2,30	18,0	764,4	0,378	—0,056	1,220	0,330	0,048	0,066
43	2,33	17,0	760,0	0,440	—0,113	1,217	0,337	0,103	0,012
44	2,82	18,0	764,3	0,536	—0,084	1,220	0,496	0,040	0,100
45	3,20	18,0	764,4	0,722	—0,158	1,220	0,635	0,087	0,077
46	3,26	17,0	760,0	0,809	—0,160	1,217	0,658	0,152	0,083

Stauscheibe nach Fig. II in einem Rohr von 160 mm Weite.

47	1,05	19,0	762,6	0,088	—0,015	1,213	0,067	0,021	0,010

Die Stauscheibe wurde nun entsprechend den früheren Versuchen in das Rohr von 92 mm Weite eingesenkt.

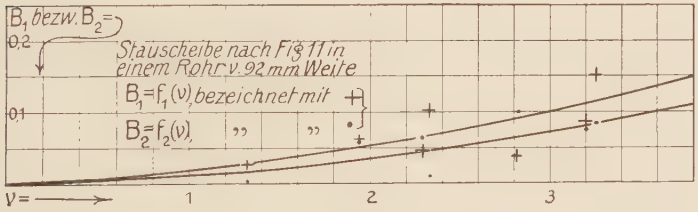


Fig. 13.

Die betreffenden Versuchsergebnisse enthält gleichfalls die genannte Tabelle, ihre graphische Vereinigung Fig. 13.

Beide Kurven scheinen nur unwesentlich voneinander abzuweichen, wenn überhaupt ein Unterschied vorhanden ist, so dafs die betreffende Stauscheibe für Rohre von

etwa 100 mm Weite an und für kleinere Geschwindigkeiten brauchbar erscheint, im Gegensatz zu der früheren Stauscheibe, die sich erst bei 300 mm Weite des Rohres brauchbar zeigte.

Trotz der gewonnenen Resultate wurde diese Stauscheibe noch in ein Rohr von 160 mm Weite gesenkt. Die gewonnenen Zahlen sind auf Seite 41 gegeben. Ein Vergleich mit der Kurve Fig. 13 zeigt, dafs die Stauscheibe tatsächlich von etwa 100 mm weiten Rohren ab brauchbar wird.

Es dürfte also wohl für ziemlich gewifs gelten, dafs Stauscheiben, die möglichst dünne Zuleitungsrohre tragen und dieselben hintereinander angeordnet erhalten, damit in der Nähe der Stauscheiben möglichst wenig Querschnittsverengungen eintreten und Wirbel nicht entstehen können, dann brauchbar werden, wenn das zu untersuchende Rohr einen etwa zehnmal so grofsen Durchmesser besitzt als die Stauscheibe. Ist die Konstruktion dagegen eine mangelhafte, werden sie erst in Rohren brauchbar, die einen weit gröfseren Durchmesser haben, im vorliegenden Falle genügte noch nicht ein etwa 25facher. Es mag an dieser Stelle erwähnt werden, dafs die Zuleitungsrohre aber auch keine geringere lichte Weite als 1 mm erhalten dürfen, weil sonst zu leicht Verstopfungen eintreten und der Druck zu schlecht zum Manometer fortgeleitet wird.

Für bestimmte andere Versuche des Verfassers schien es wünschenswert, trotz der vorhergehenden Ergebnisse noch Rohre bis zu 50 mm Durchmesser herab mit Stauscheiben zu untersuchen. Es enstand daher die Frage, ob nicht in diesem Falle die Recknagelschen Formeln Gültigkeit erhalten würden, wenn man den Stauscheiben andere, passendere Formen gäbe. Da sich aus diesen Versuchen einige interessante Schlüsse für die vorliegende Arbeit ziehen lassen, mögen sie im folgenden aufgeführt

werden. Indessen sollen die gefundenen Ergebnisse dem Thema dieser Arbeit entsprechend nur insoweit diskutiert werden, als die betreffenden Apparate und Gesetze für die Messung von Luftgeschwindigkeiten in Betracht kommen können. Für den genannten Zweck schien es zu genügen, für gewöhnlich nur einen oder zwei Punkte der B-Kurven, allerdings durch Mittelwerte, zu bestimmen.

Es wurde zunächst eine Stauscheibe nach Fig. 14 untersucht, und zwar in einem Rohr von 54 mm Weite. Beim ersten Versuche wurde die Scheibe dem Luftstrom entgegengehalten und so der Druck P_1 bestimmt, sodann wurde sie um 180° gedreht und ohne Veränderung der Versuchseinrichtung der Druck P_2 ermittelt. Die betreffenden Versuche ergaben:

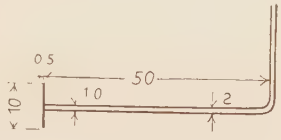


Fig. 11.

Nr.	v	t	b_0	P_1	P_2	s	$\frac{v^2 s}{2g}$	B_1	B_2
48	9,11	19,0	755,9	8,730	—	1,202	5,084	3,646	—
49	9,11	19,0	755,9	—	1,530	1,202	5,084	—	3,411

Des besseren Vergleiches wegen sind in Fig. 15 nochmals die für die beiden früheren Stauscheiben gefundenen Kurven (vgl. Fig. 9 und 12) als Nr. 1 und 2 eingetragen worden. Auch die vorstehenden Resultate enthält diese Figur (vgl. daselbst Kurve 3). Die Werte B_1 und B_2 stimmen hier überraschend überein. Würde der Wert B_2 nicht, entsprechend allen früheren Versuchen, tiefer fallen als der von B_1, wäre man geneigt, die geringe noch vorhandene Abweichung als Beobachtungsfehler zu erklären.

Die Vergleichung dieser Stauscheibe mit den beiden früher untersuchten scheint zu ergeben, daſs entweder

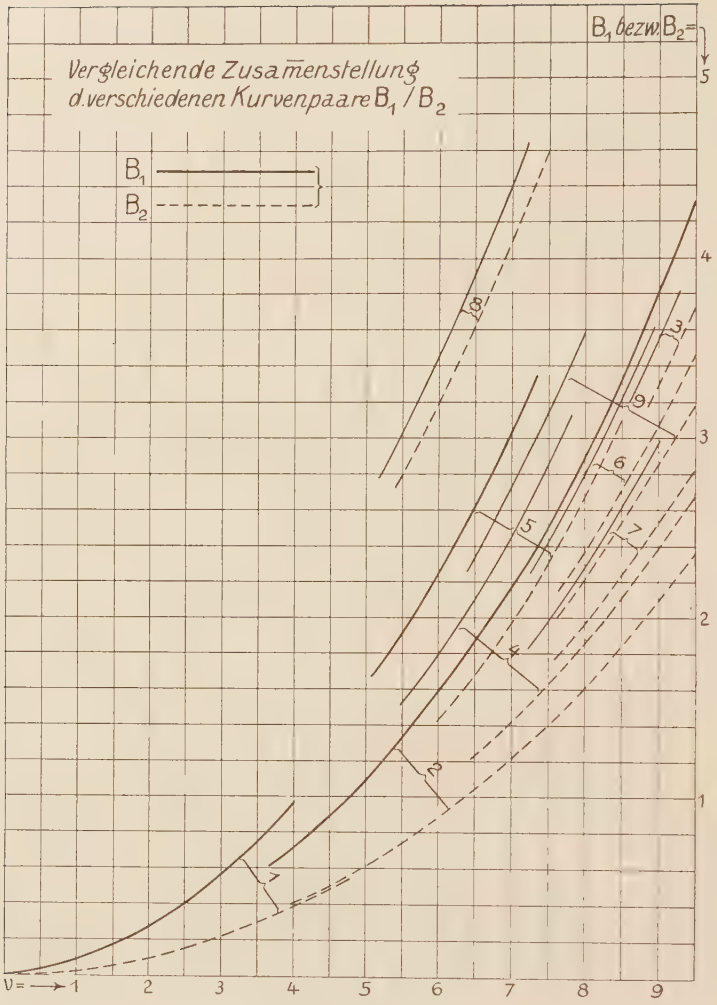


Fig. 15.

die dort vorhandenen Zuleitungsröhrchen einen schädlichen Einfluſs ausüben, oder daſs der den Winddruck aufnehmende Teil keine Dose, sondern entsprechend den

Recknagelschen Versuchen eine regelrechte Scheibe von möglichst geringer Dicke sein mufs.

Um hierüber eventuell noch Klarheit zu schaffen, wurde ein einfaches rechtwinklig umgebogenes Röhrchen nach Fig. 16 genau wie vorher in einem Rohre von 54 mm Weite untersucht. Auch dieses Röhrchen mufste nach jedem Versuche um 180° gedreht werden. Die gefundenen Zahlen sind folgende:

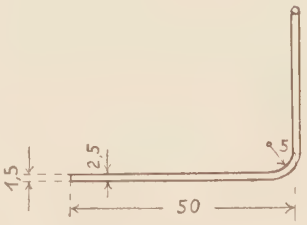


Fig. 16.

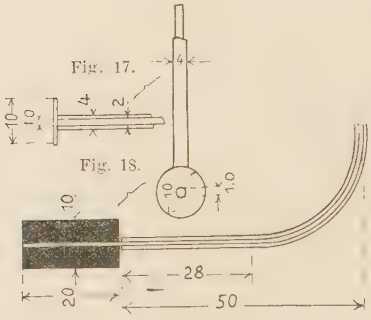
Nr.	c	t	b_0	P_1	P_2	s	$\frac{c^2 s}{2g}$	B_1	B_2
50	4,76	18,2	760,5	2,686	0,182	1,213	1,401	1,285	0,700
51	8,78	18,2	760,5	8,319	0,435	1,213	4,766	3,553	2,198

Wie die Eintragung in Fig. 15 ergibt (Kurve 4), ist ein solches rechtwinklig umgebogenes Röhrchen nicht schlecht, es scheint eben so gut als die Stauscheibe Fig. 11, kommt jedoch nicht annähernd der vorhergehend betrachteten gleich. Es scheint daraus doch wohl hervorzugehen, dafs ein derartiges Instrument eine möglichst dünne Scheibe sein mufs, keine Dose von nennenswerter Dicke, dafs ferner die Zuleitungsröhrchen die entstehenden Drücke beeinflussen und deshalb möglichst dünn und zweckmäfsig angeordnet sein müssen. Derartige rechtwinklig umgebogene Röhrchen wie Fig. 16 sind für Druckmessungen schon vielfach benutzt worden. Es scheinen mir daher die vorhergehenden Versuche von besonderem Wert zu sein.

Die Stauscheibe Fig. 14 hat den Nachteil, dafs man zwei Messungen hintereinander ausführen mufs, beim zweitenmal mit Drehung der Scheibe um 180°. Hierin

liegt eine gewisse Unvollkommenheit des Apparates; man hat ja gerade auch aus diesem Grunde die Dosenform mit der Scheidewand in der Mitte gewählt. Um nach den vorhergehenden Versuchen dennoch die Scheibenform beizubehalten, aber gleichzeitige Messung der Pressungen vor und hinter der Scheibe zu ermöglichen, wurde die Stauscheibe Fig. 17 konstruiert. Die Scheibenform ist hier gewahrt, Pressung vor und hinter der Scheibe lassen sich gleichzeitig untersuchen, die Zuleitungsröhrchen bieten nur geringen Widerstand und kommen erst in Betracht, wenn die vom Luftstrom bedingten Drücke an der Scheibe bereits gemessen sind, vgl. auch Fig. 18–20. Diese Scheibe wurde in demselben Rohre von 54 mm untersucht und ergab folgende Resultate:

Fig. 17.



Nr.	r	t	b_0	P_1	P_2	s	$\frac{r^2 s}{2g}$	B_1	B_2
52	5,31	19,0	755,9	3,750	0,377	1,202	1,727	2,032	1,016
53	8,84	19,0	755,9	9,315	1,700	1,202	4,788	4,527	3,475

Der erwartete Erfolg dieser Konstruktion blieb demnach aus, die Scheibe ist wieder erheblich schlechter geworden als Fig. 14 (siehe Vergleichstafel Fig. 15 Kurve 5). Im Vergleich zu dem Kurvenpaar 4 auf Tafel 15 fallen beide Kurven jetzt höher. Der Grund ist wohl der, dafs nunmehr der Luftbewegung ein weit gröfserer Widerstand entgegengesetzt wird. Im Vergleich zum Kurvenpaar 3 fällt jetzt die B_2-Kurve etwas, die B_1-Kurve erheblich höher. Vielleicht bieten die Zuleitungsröhrchen jetzt

einen gröfseren Widerstand dar, wodurch B_1 in die Höhe gerückt wird, während anderseits durch die Zuleitungsröhrchen auch die Saugung verringert und damit B_2 ebenfalls in die Höhe gerückt wird.

Vielleicht scheint auch von Einflufs, dafs der Druck P_2 nicht am Mittelpunkt der Rückseite entnommen und wegen des Ineinandersteckens der Rohre zu weit hinter der Scheibe gemessen wird, auch dürfte die saugende Wirkung der Scheibe durch die vom Mittelpunkt der Rückseite abgehenden Rohre beeinträchtigt werden.

Um nochmals zu zeigen, ob der Apparat eine wirkliche Scheibe sein mufs oder in der Bewegungsrichtung der Luft nennenswerte Ausdehnung haben darf, wurde auf die Scheibe Fig. 17 ein Zylinder aufgesetzt, so dafs die Stauscheibe Fig. 18 entstand. Die Untersuchung erfolgte in dem Rohr von 54 mm Weite und ergab folgende Zahlen:

Nr.	v	t	b_0	P_1	P_2	s	$\frac{v^2 s}{2g}$	B_1	B_2
54	8,85	17,5	751,8	8,267	0,961	1,202	4,802	3,465	2,738

Die Vergleichstafel Fig. 15 enthält diese Zahlen als Kurve 6. Trotzdem hier nun keine Scheibe benutzt worden ist, hat sich dennoch ein verhältnismäfsig gutes Resultat ergeben.

Im Vergleich zum Kurvenpaar 5 zeigt sich, dafs B_1 erheblich, B_2 etwas tiefer fällt. Vielleicht entstehen bei allen diesen Apparaten an der Vorderseite Wirbel, die nunmehr durch den langen Zylinder wieder ausgeglichen werden und in mehr oder weniger parallele Luftfäden verwandelt werden. Dadurch wird dann der Luftwiderstand, welcher in B_1 zum Ausdruck kommt, geringer, und anderseits wird die saugende Wirkung vergröfsert,

B_2 also niedriger. Daraus geht dann aber auch hervor, dafs für die Recknagelschen Beziehungen nur Scheiben verwendet werden dürfen.

Um zu sehen, welchen Einfluſs die Weite des Zylin-

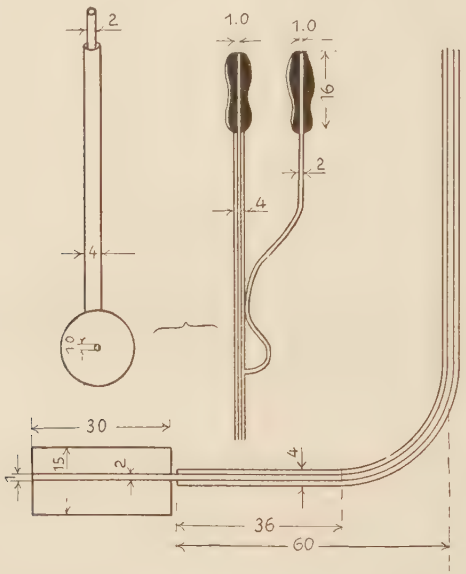


Fig. 19.

ders hat, wurde die Stauscheibe Fig. 19 untersucht, wieder in dem Rohr von 54 mm Weite. Die gefundenen Zahlen sind folgende:

Nr.	r	t	b_0	P_1	P_2	s	$\frac{r^2 s}{2g}$	B_1	B_2
55	9,18	19,5	761,7	8,280	0,695	1,209	5,193	3,087	2,616

Ein nennenswerter Einfluſs im Verhältnis zur vorhergehenden Stauscheibe scheint nicht vorhanden zu sein (vgl. Fig. 15 Kurve 7). Der Gesamtwiderstand, der in B_1

zum Ausdruck kommt, ist abermals kleiner geworden, die Saugung wieder verbessert, da B_2 noch weiter gefallen ist.

Es wurde daher ein Zylinder von 35 mm Weite gewählt (vgl. Stauscheibe Fig. 20). Die Untersuchung erfolgte wieder in dem Rohre von 54 mm Weite und ergab folgende Zahlen:

Nr.	v	t	b_0	P_1	P_2	s	$\frac{v^2 s}{2g}$	B_1	B_2
56	6,47	18,1	756,0	6,49	2,37	1,206	2,634	3,856	3,348
57	11,15	18,1	756,0	17,39	6,63	1,206	7,635	9,750	9,455

Fig. 21 enthält die graphische Vereinigung dieser Zahlen, Fig. 15 als Kurve 8 das für die Vergleichung geeignete Stück. Der Widerstand, wohl wegen der übertriebenen Querschnittsverengung, ist jetzt erheblich gewachsen, zugleich scheint die Saugung nur unbedeutend, wohl weil der in Betracht kommende Luftstromquerschnitt im Verhältnis zu dem des Zylinders zu unbedeutend ist, es werden sich daher an der Rückseite alle möglichen Wirbel bilden, die eine gröfsere Saugung nicht zustande kommen lassen. Für Geschwindigkeitsmessungen scheint dagegen die Stauscheibe vorzüglich zu sein, insofern als die beiden Werte B_1 und B_2 fast zusammenfallen. Indessen ist zu bedenken,

Fig. 20.

dafs durch ihre Einführung in das Rohr ein nicht unerheblicher Widerstand geschaffen wird, was in den meisten Fällen ihre Verwendung wieder ausschliefsen dürfte.

Aus den vorhergehenden Versuchen folgt zunächst,

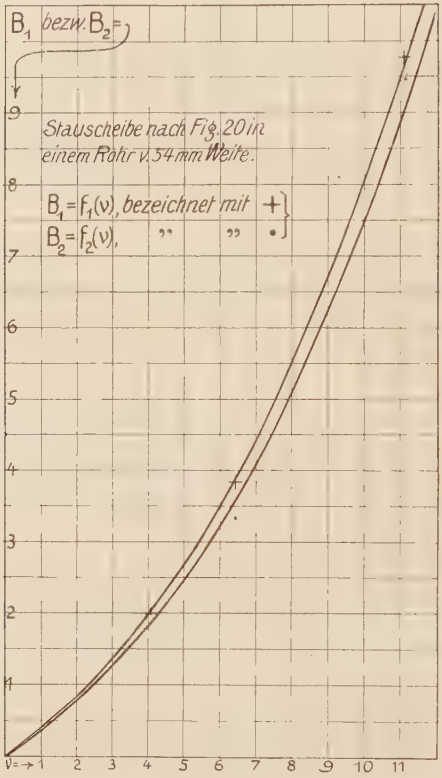


Fig. 21.

dafs mit den Zylindern und den ineinandergesteckten Zuleitungsrohren brauchbare Apparate nicht geschaffen werden können. Um die Scheibenform beizubehalten und dennoch gleichzeitiges Beobachten der beiden Pressungen zu ermöglichen, wurde noch die Form Fig. 22

konstruiert. Die Untersuchung in dem Rohr von 54 mm Weite ergab folgende Zahlen:

Nr.	v	t	b_0	P_1	P_2	s	$\frac{v^2 s}{2g}$	B_1	B_2
58	8,84	19,0	755,9	9,270	1,160	1,202	4,788	4,482	2,932

Die vergleichende Zusammenstellung Fig. 15 enthält die betreffenden Kurvenstücke als Nr. 9. Interessant ist der Vergleich zum Kurvenpaar 3. Der Gesamtwiderstand ist danach gewachsen, insofern als B_1 gröfser geworden ist; die Saugung ist jedoch ebenfalls gröfser geworden, da B_2 gefallen ist. Ein Grund für das letztere ist nicht leicht zu finden, jedenfalls dürfte aber auch diese Stauscheibenform für Geschwindigkeitsmessungen nicht in Betracht kommen.

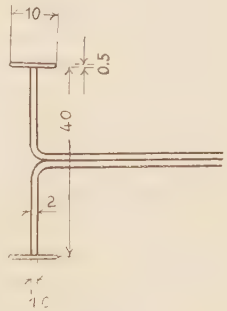


Fig. 22.

Aus allen diesen Versuchen scheint folgendes hervorzugehen: Die beste Form für eine Stauscheibe ist eine wirkliche Scheibe von möglichst geringer Dicke, entsprechend Fig. 14, also keine Dose. Mit einer solchen Scheibe lassen sich wahrscheinlich noch Rohre bis zum Fünffachen des Scheibendurchmessers herab untersuchen, sie haben aber den Nachteil, dafs sie sich wegen der winkelförmigen Zuleitungsrohre schlecht einführen lassen, und dafs vor allem zwei Beobachtungen nötig sind, die zweite, nachdem die Scheibe um 180° gedreht ist, was sich wiederum in vielen Fällen wegen der Zuleitungsrohre kaum ausführen lassen wird. Man wird daher meistens wieder zur Dosenform übergehen, mufs sie dann aber möglichst der Scheibenform nähern, und zwar da-

durch, dafs die Höhe des die Dose bildenden Zylinders im Verhältnis zum Zylinderdurchmesser möglichst klein gehalten wird.

Die Zuleitungsrohre müssen dann weiter derart angeordnet werden, dafs Wirbel nicht entstehen können, am besten also hintereinander. Sie müssen möglichst dünn gehalten werden, jedoch nicht unter 1 mm lichte Weite. In dem Luftstrom vor der Scheibe darf nichts vorhanden sein, das Wirbel erzeugen könnte, also nicht etwa Thermometergefäfse, Kniee in der Leitung, hervorspringende Teile usw. Mit solchen Stauscheiben lassen sich dann noch Rohre bis etwa zum Zehnfachen des Stauscheibendurchmessers herab untersuchen. Ist die Konstruktion der Stauscheibe dagegen eine nach vorstehenden Ergebnissen unzweckmäfsige, etwa die der Fig. 8, so müssen die zu untersuchenden Rohre weit gröfseren Durchmesser besitzen, in diesem Falle genügte noch nicht ein etwa 25facher desjenigen der Stauscheibe.

Winkelförmig umgebogene Röhrchen nach Fig. 16 können nur für angenäherte Untersuchungen Verwendung finden.

In den vorhergehenden Betrachtungen ist der Wert der Drücke B_1 und B_2 eingehend untersucht worden, es möge indessen nochmals betont werden, dafs es sich hier wahrscheinlich nur um fingierte Gröfsen handelt, deren Einführung aber von Vorteil war, solange die angestellten Versuche nur daraufhin diskutiert werden sollten, ob diese oder jene Stauscheibenform für die Verwendung in Rohren und unter Beibehaltung der Recknagelschen Beziehungen brauchbar wäre oder nicht. In Wirklichkeit wird zwischen B_1 und B_2 nur der durch die Stauscheiben hervorgerufene, aber nicht aus den vorhergehenden Versuchen nach den Recknagelschen Beziehungen zu berechnende Spannungsabfall bestehen. Er ist für Stauscheiben zweckmäfsiger Konstruktion und geringer Querschnittsverengung zu ver-

nachlässigen. Der dann vorn und hinten gleiche Druck werde für das Folgende mit B bezeichnet. Die Pressungen P_1 und P_2 sind dann jedenfalls Funktionen von B und v. Die schon von Newton herrührende Form dieser Funktionen, die dann auch von den neueren Forschern beibehalten worden ist, vgl. Recknagels und Schreibers Veröffentlichungen, heifst mit den in dieser Arbeit benutzten Buchstaben, wenn f_1 und f_2 Erfahrungszahlen sind:

12. $$P_1 = B + f_1 \cdot \frac{v^2 s}{2 g},$$

13. $$P_2 = B - f_2 \cdot \frac{v^2 s}{2 g}.$$

Die Differenz, die sich auch am Manometer sehr bequem darstellen läfst, vgl. Seite 29, ergibt:

14. $$(P_1 - P_2) = (f_1 + f_2) \cdot \frac{v^2 s}{2 g},$$

das heifst, die alte Newtonsche Formel. Es sei weiter

15. $$(P_1 - P_2) = p,$$

16. $$(f_1 + f_2) = f,$$

dann ist

17. $$p = f \cdot \frac{v^2 s}{2 g}$$

oder nach v aufgelöst

18. $$v = \sqrt{\frac{2 g}{s \cdot f} p}.$$

Die Funktion, welche den Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit v und dem erzeugten Druck p darstellt, enthält somit die Konstante f. Letztere ist aber nach der vorhergehenden Entwicklung keine besondere Gröfse für sich, sondern eine Summe, welche aus den beiden Summanden f_1 und f_2 besteht. Leider geben fast alle früheren Versuche und ebenso die danach konstruierten Apparate nur diese Summe f, nicht aber ihre Bestandteile f_1 und f_2 an, wie schon Schreiber, vgl. weiter unten, bedauernd erwähnt.

Die vorstehenden Entwicklungen gelten sowohl für den Fall, dafs man den mittleren Druck betrachtet, als auch für den Fall, dafs man nur den Druck im Mittelpunkt einer Stauscheibe zugrunde legt, nur ist der Wert der Konstanten f_1, f_2, f im ersteren Falle ein anderer als im zweiten. Mit Ausnahme Recknagels haben sämtliche bisherigen Beobachter nur den mittleren Druck der Platte bestimmt; die gefundenen Resultate sind etwa folgende:

Die Hütte, Taschenbuch für Ingenieure, 1902, gibt in Band I Seite 261 für f den Wert 1 bis 3 an.

Grashof leitet in Band I Seite 877 auf theoretischem Wege die Abhängigkeit der Konstanten f von der Gröfse der Stauscheibe und der Gröfse des Stromquerschnittes her. Für den Fall, dafs es sich um eine unbegrenzte Flüssigkeit handelt, heifst es jedoch auf Seite 886, dafs »die Koeffizienten f_1, f_2 und f nur durch Beobachtung und Messung mit einiger Zuverlässigkeit bestimmt werden können«.

Nach seiner Wiedergabe, vgl. Band I Seite 888, findet Dubuat, dafs f nicht unerheblich gröfser ist, wenn der Körper ruht und die Flüssigkeit sich bewegt, als wenn der Körper sich bewegt und die Flüssigkeit ruht, aufserdem, dafs die Dicke der Scheiben von Einflufs ist.

Auf Seite 890 werden dann die Versuche von Dubuat und Duchemin besprochen. Beide haben mit grofser Übereinstimmung gefunden, dafs f_1 stets konstant und zwar 1,2, f_2 dagegen veränderlich ist. Für sehr dünne Platten ergab sich f zu 1,86, für Körper dagegen im Mittel zu 1,4. Allerdings betrug die Geschwindigkeit bei den Versuchen nur 1 m/Sek.

Grashof folgert auf Seite 891, dafs zweckmäfsig nach Poncelet bis auf weiteres $f = 1{,}3$ zu setzen wäre, dafs aber dann die Fläche nicht viel gröfser oder kleiner als 0,1 qm sein dürfe, da f von der Fläche abhängig zu sein

scheine, dafs aber das Gesetz dieser Abhängigkeit noch nicht sicher angegeben werden kann.

Es mufs erwähnt werden, dafs alle die vorhergehenden, von Grashof aufgeführten Versuche nicht mit Luft, sondern mit Wasser angestellt worden sind. Es ist demgemäfs auch in den vorhergehenden Darlegungen das Wort »Wasser« stets durch »Flüssigkeit« ersetzt worden. Grashof sagt jedoch in Band I Seite 897:

»Den freilich vielfach widerspruchsvollen betreffenden Erfahrungen läfst sich im ganzen entnehmen, dafs dem Koeffizienten f dieselben Werte beigelegt werden können wie unter sonst gleichen Umständen beim Wasser, solange die Fläche der Scheibe und v gewisse Grenzen nicht überschreiten, insbesondere $v < 10$ m/Sek. ist.«

Aus den weiteren daselbst gegebenen Erörterungen Grashofs folgt, dafs die Fläche ungefähr 0,1 qm sein mufs.

Die Luft wird an der Vorderseite des betreffenden Körpers eine Verdichtung hervorrufen, die selbstverständlich nach dem Rande zu abnehmen wird. Indessen wird diese Verdichtung der Luft nur bei grofsen Flächen des entgegengehaltenen Körpers in Betracht kommen, es wäre also möglich, dafs dann eine Vergröfserung von p eintreten, f also mit der Fläche variabel sein würde. Tatsächlich hat d'Aubuisson, auf Bordas Versuche gestützt, eine derartige Abhängigkeit abgeleitet, nämlich

$$f = 2{,}16 \cdot F^{0{,}1},$$

wenn F die Fläche der entgegengehaltenen Scheibe bedeutet, vgl. Grashof Band I Seite 898.

Ebendaselbst findet sich die Angabe, dafs allgemein eine Abhängigkeit der Konstanten f von v, speziell von v^2 angenommen wird.

Interessant sind auch die Resultate der Didionschen Versuche, Seite 899. Der Beobachter findet bei Bewegung in geradliniger Bahn andere Zahlen als bei Be-

wegung im Kreise, im letzteren Falle trotz der viel kleineren Fläche den Koeffizienten 1,2 mal so grofs. Ebendasselbe hat später auch Recknagel gefunden, vgl. weiter unten. Der Grund hierfür dürfte folgender sein. Bei geradliniger Bewegung der Scheibe bildet sich an der Vorderseite fast relativ ruhende verdichtete Luft, die gewissermafsen eine den Widerstand vermindernde Zuspitzung erfährt. Bei der Kreisbewegung aber wird die Luft ähnlich wie bei einem Ventilator nach aufsen getrieben, wodurch eben ein gröfserer Widerstand für die Scheibe hervorgerufen wird.

Weifsbach, Lehrbuch der Mechanik 1875, folgert aus den Versuchen von Dubuat und aus denen von Thibault

für den Luft- und Wasserstofs gegen eine ruhende ebene Fläche $f = 1{,}86$,

dagegen, jedoch mit weniger Sicherheit, für den Widerstand der Luft und des Wassers gegen eine bewegte ebene Fläche $f = 1{,}25$.

Gerlach, Zivilingenieur 1885, findet für ebene Flächen, deren Länge im Verhältnis zur Breite sehr grofs ist,

$$f = 0{,}88.$$

Wild, vgl. Literaturangaben, gibt an, dafs Muncke aus den Versuchen von Woltmann, de Borda und Hutton

$$f = 1{,}3 \pm 0{,}1$$

abgeleitet hat.

Hagen führte auf Grund seiner Versuche den Umfang der Platte als von Einflufs für f ein.

Dines, 1889, findet für ebene Platten 1,25 bis 1,45. Im besonderen fand er für eine kreisförmige Platte von 344 mm Durchmesser $f = 1{,}33$, für ein Quadrat von 305 mm Seitenlänge $f = 1{,}34$, für ein Rechteck von $152 \cdot 610$ mm $f = 1{,}36$.

v. Löfsl endlich gibt neuerdings 2,0 an.

Zum gleichen Gegenstande sagt Schreiber, vgl. die Literaturangaben:

»Diese beiden Koeffizienten (nämlich f_1 und f_2) müssen scharf getrennt gehalten werden, wenn man die Druckwirkungen richtig verstehen soll. Es mufs als ein Übelstand der Druckplatten-Anemometer bezeichnet werden, dafs sie nur f, nicht aber dessen Bestandteile angeben.

Über die Gröfse von f findet man alle nur wünschenswerten Beträge von 0,8 bis 4,0 und mehr angegeben.

Man unterscheidet vielfach zwischen dem Stofs- und Widerstandskoeffizienten, es scheint mir aber der exakte Nachweis, dafs ein solcher Unterschied besteht, nicht beigebracht zu sein.«

Der Genannte folgert dann weiter aus der Gesamtheit der über dieses Gebiet vorliegenden Versuche, dafs der Wert

$$f = 1{,}3$$

die gröfste Wahrscheinlichkeit als Widerstandskoeffizient besitzt. Da seiner Meinung nach ferner der Unterschied zwischen Stofs- und Widerstandswirkung nicht zweifellos festgestellt ist, sich auch theoretisch kaum als sicher bestehend ableiten läfst, soll man denselben Koeffizienten auch für die Stofswirkung annehmen.

Wie bereits erwähnt, hat Recknagel nicht nur den mittleren Druck der Scheibe, sondern auch die Druckverteilung auf der Scheibe, speziell die Drücke im Mittelpunkte der Scheibe vorn und hinten bestimmt. Er erhält für den mittleren Druck die Zahlen

$$f_1 = 0{,}75,$$
$$f_2 = 0{,}37,$$
$$f = 1{,}12,$$

für die Drücke in den Mittelpunkten

$$f_1 = 1{,}00,$$
$$f_2 = 0{,}37,$$
$$f = 1{,}37.$$

Die Druckverteilung über die ganze hintere Seite der Scheibe ist also demnach eine gleichmäfsige, über die Vorderseite dagegen eine vom Mittelpunkte nach aufsen abnehmende. Er hat weiter aus seinen Versuchen einwandfrei nachgewiesen, dafs zwischen geradliniger Bewegung und kreisförmiger unterschieden werden mufs.

Wie aus allen diesen Erörterungen hervorgeht, sind von den verschiedenen Beobachtern ganz verschiedene Gröfsen als von Einflufs auf den Wert von f angegeben worden. Es sind:

Gröfse, Dicke, Umfang und Form der Platte,
Gröfse des Stromquerschnitts,
Geschwindigkeit.

Dazu kommt als von Einflufs der Umstand, ob die Platte ruht oder die Luft, endlich ob geradlinige Bewegung vorliegt oder kreisförmige.

Auch die weiter vorn aufgeführten Versuche 1 bis 58 des Verfassers können daraufhin diskutiert werden, welcher der obigen Einflüsse berechtigt ist und welcher nicht. Wie die bei den einzelnen Versuchen gegebenen Erörterungen lehren, sind durch diese Versuche als von Einflufs erkannt:

Dicke, Gröfse und Form der Stauscheibe,
Gröfse des Luftstromquerschnitts.

Der Umfang der Scheibe ist schon durch ihre Gröfse und Form gegeben.

Es bleibt somit von den durch frühere Beobachter angegebenen Einflüssen die Geschwindigkeit und der Umstand, ob die Scheibe ruht oder sich bewegt, und ferner, ob geradlinige Bewegung vorliegt oder kreisförmige.

Zur Untersuchung der beiden letzten Punkte sind die genannten Versuche nicht geeignet, vielleicht aber einigermafsen zur Untersuchung bezüglich des Einflusses der Geschwindigkeit; wegen der Resultate vgl. weiter unten.

Als Zahlenwert scheint sich aus den Versuchen der früheren Beobachter für den mittleren Druck etwa 1,1 bis 1,3 zu ergeben.

Es lohnt vielleicht, auch die vorhergehenden Versuche des Verfassers daraufhin zu untersuchen, wie hoch sich nach ihnen der Wert von f stellt, natürlich der Art der untersuchten Stauscheiben entsprechend unter der Voraussetzung, dafs die Drücke im Mittelpunkt der Scheibe gemessen werden. Die betreffende Gleichung lautete:

$$(P_1 - P_2) = f \cdot \frac{v^2 \cdot s}{2g}$$

oder

$$f = \frac{(P_1 - P_2)}{\frac{v^2 s}{2g}}$$

In den weiter vorn aufgeführten Versuchsresultaten sind die Werte $(P_1 - P_2)$ und $\frac{v^2 \cdot s}{2g}$ enthalten, f ist mithin einfach zu berechnen. Es ergeben sich die Zahlen auf Seite 60 und 61.

Wie aus ihnen hervorgeht, dürfte die Geschwindigkeit der Luft v kaum einen Einflufs auf den Wert des Koeffizienten f ausüben, dagegen zeigen die gefundenen Zahlen gleichfalls, dafs Dicke, Gröfse und Form der Stauscheibe sowie die Gröfse des Luftstromquerschnittes von bedeutendem Einflufs auf den Wert f sind. Die gefundenen Zahlen schwanken bei den Versuchen für die verschiedenen Stauscheiben und Stromquerschnitte zwischen 1,25 und 3,83.

Aus alledem geht meiner Ansicht nach hervor, dafs bei Luftströmen von gröfserem Querschnitte, also etwa bei Windströmen, nur Dicke, Gröfse und Form der Stauscheibe in Betracht kommen. Nimmt man in diesem Falle immer dünne Platten bzw. plattenähnliche Dosen,

wählt man ferner stets kreisförmige Platten von höchstens 500 mm Durchmesser, dann dürften die Recknagelschen Zahlenwerte gelten.

Stauscheibe nach Fig. 8 in einem Rohr von 54 mm Weite.

Nr.	v	f	Nr.	v	f	Nr.	v	f
1	0,73	1,70	8	1,58	2,37	14	1,98	2,23
2	0,85	3,25	9	1,59	2,00	15	2,72	2,30
3	1,25	2,61	10	1,63	2,04	16	2,97	2,12
4	1,40	2,08	11	1,69	1,96	17	3,08	2,33
5	1,40	2,25	12	1,73	1,74	18	3,20	2,35
6	1,46	1,80	13	1,82	2,14	19	3,39	2,13
7	1,51	2,38						

Im Mittel: 2,20.

Stauscheibe nach Fig. 8 in einem Rohr von 92 mm Weite.

Nr.	v	f	Nr.	v	f	Nr.	v	f
20	0,70	2,10	25	2,18	2,11	29	2,99	2,46
21	1,36	2,18	26	2,22	2,09	30	2,99	1,88
22	1,38	3,83	27	2,35	2,37	31	3,17	2,27
23	1,79	3,24	28	2,55	2,26	32	3,28	2,07
24	2,17	2,54						

Im Mittel: 2,42.

Ebenso, aber in einem Rohr von 160 mm Weite.

Nr. 33 $v = 1{,}04$ $f = 2{,}56$

Ebenso, aber in einem Rohr von 250 mm Weite.

Nr. 34 $v = 0{,}43$ $f = 3{,}09$

Stauscheibe nach Fig. II in einem Rohr von 54 mm Weite.

Nr. 35	$v = 3{,}53$	$f = 1{,}51$	
36	4,64	1,77	
37	8,84	2,00	Im Mittel: 1,75
38	9,05	1,61	
39	9,11	1,86	

Ebenso, aber in einem Rohr von 92 mm Weite.

Nr. 40	$v = 1{,}33$	$f = 1{,}65$	
41	1,95	1,39	
42	2,30	1,31	
43	2,33	1,64	Im Mittel: 1,44
44	2,82	1,25	
45	3,20	1,39	
46	3,26	1,47	

Ebenso, aber in einem Rohr von 160 mm Weite.

Nr. 47 $v = 1{,}05$ $f = 1{,}54$

Besondere Stauscheibenformen in einem Rohr von 54 mm Weite.

Nr. 48/49	$v = 9{,}11$	$f = 1{,}42$	
Nr. 50	$v = 4{,}76$	$f = 1{,}79$	Im Mittel: 1,72
51	8,78	1,65	
Nr. 52	$v = 5{,}31$	$f = 1{,}95$	Im Mittel: 1,77
53	8,84	1,59	
Nr. 54	$v = 8{,}85$	$f = 1{,}52$	
Nr. 55	$v = 9{,}18$	$f = 1{,}46$	
Nr. 56	$v = 6{,}47$	$f = 1{,}57$	Im Mittel: 1,49
57	11,15	1,41	
Nr. 58	$v = 8{,}84$	$f = 1{,}69$	

Handelt es sich aber um Luftströme von geringerem Querschnitte, so kommt zu Dicke, Gröfse und Form der Stauscheibe noch die Gröfse des Stromquerschnittes als von Einflufs hinzu. Der Zahlenwert für f ist dann ein äufserst schwankender, so dafs es meiner Überzeugung nach aufserordentlich schwierig ist, in diesem Falle die Funktion P_1 bzw. $P_2 = f\,(B, v)$ einwandfrei darzustellen; jedenfalls ist in einem solchen Falle Vorsicht in der Anwendung der Stauscheiben und der bezüglichen Formeln geboten.

In beiden Fällen aber mufs zwischen geradliniger und kreisförmiger Bewegung unterschieden werden, wie Dubuat und neuerdings Recknagel einwandfrei dargetan haben. Ob jedoch ein Unterschied zwischen Widerstand und Stofs der Luft besteht, also zwischen dem Falle, dafs die Luft ruht, der Körper aber sich bewegt, und dem umgekehrten, ist noch nicht erwiesen.